

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

INSINÖÖRITIEDEIDEN JA ARKKITEHTUURIN TIEDEKUNTA

RAKENNE- JA RAKENNUSTUOTANTOTEKNIIKAN LAITOS

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Laura Ranin

JUNARATOJEN VAHVISTUS SUIHKUINJEKTOINNILLA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 8.6.2009

Valvoja: Professori Olli Ravaska

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Annina Peisa

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

DIPLOMITYÖN
TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Laura Ranin		
Diplomityö:	Junaratojen vahvistus suihkuinjektoinnilla		
Päivämäärä:	8.6.2009	Sivumäärä:	81 + 8
Professuuri:	Pohjarakennus ja maamekaniikka	Koodi:	Rak-50
Valvoja:	Professori Olli Ravaska		
Ohjaaja:	Diplomi-insinööri Annina Peisa		
Avainsanat:	Suihkuinjektointi, ratapenger, paaluhattuperustus, holvautuminen, painumaongelma		
<p>Tässä työssä on tarkasteltu junaratojen korjaamista suihkuinjektointimenetelmällä. Työn on tilannut ja rahoittanut Lemminkäinen Infra Oy. Tutkimusta on edeltänyt Ratahallintokeskuksen raportti vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjausmenetelmistä.</p> <p>Tämän työn tarkoituksena oli selvittää suihkuinjektointimenetelmän soveltuvuus junaratojen painumaongelmien korjaamiseen. Tarkasteluissa suihkuinjektointimenetelmää verrattiin muihin käytössä oleviin korjausmenetelmiin. Työn tavoitteena oli perehtyä suihkuinjektointimenetelmään ja paaluhattupenkereiden toimintaan kirjallisuuskatsauksella, ja selvittää junaradalla toteutettavassa suihkutustyössä mahdollisesti ilmeneviä ongelmia ja haasteita koekohteen ja kirjallisuuskatsauksen avulla. Tutkimuksessa pyrittiin myös selvittämään mahdollinen jatkotutkimuksen tarve.</p> <p>Junaradoissa ilmenneiden painumaongelmien ymmärtämiseksi tarkasteltiin tässä työssä ensin paaluhatturakenteita kirjallisuuden avulla. Painumia syntyy penkereen holvautumisen epäonnistuessa, ja ne häiritsevät raideliikennettä ja lisäävät radan kunnossapidon tarvetta. Tutkimuksessa keskityttiin paaluhatturakenteiden toimintatapaan ja suunnittelukriteereihin, sekä junaradoilla käytettyjen paaluhatturakenteiden ongelmiin ja nykyisiin korjausmenetelmiin. Suihkuinjektointimenetelmään perehdyttiin tässä tutkimuksessa kirjallisuuskatsauksella. Kirjallisuuden ja Ratahallintokeskuksen julkaisujen avulla tarkasteltiin myös liikenteen alaisella raiteella työskentelyyn liittyviä erityispiirteitä, ja listattiin suihkuinjektointimenetelmän käytön etuja ja haittoja junaratojen korjauksessa. Koekohteen tarkastelulla haettiin käytännön ongelmia suihkuinjektointityön toteutuksessa, kun työskentely tapahtuu ilman raidevarausta ahtaassa radanvarressa.</p> <p>Tutkimuksen perusteella soveltuu suihkuinjektointimenetelmä korkeiden junapenkereiden korjaamiseen. Menetelmän avulla voidaan paaluhattujen yläpintaan muodostaa maabetoninen laatta ilman radan avaamista ja raidevarausta, jolloin vältytään suurilta liikennehaittakustannuksilta ja saavutetaan pysyvä korjaustulos. Menetelmä edellyttää paaluhattujen aseman selvittämistä ja hattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttöä. Koekohteessa huomattiin suurimmaksi käytännön ongelmaksi ratapenkereen pehmeneminen, josta johtuen suihkutuspaineita oli pienennettävä ja pilarien poikkeileikkaukset jäivät suunniteltua pienemmiksi. Tulevissa kohteissa voidaan koepilareita suihkuttamalla selvittää penkereen kestävyys kannalta sopivat suihkuinjektointiparametrit, joilla laattarakenne saadaan varmimmin muodostettua.</p>			

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Engineering and Architecture

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author:	Laura Ranin		
Thesis:	Improvement of Railway Embankments with Jet Grouting		
Date:	June 8, 2009	Number of pages:	81 + 8
Professorship:	Soil Mechanics and Foundation Engineering	Code:	Rak-50
Supervisor:	Professor Olli Ravaska		
Instructor:	Annina Peisa, M.Sc.(Tech.)		
Key Words:	jet grouting, railway embankment, pile cap foundation, arching, uneven settlement		
<p>The purpose of this study was to investigate the repair of railway embankments using the jet grouting method. It was commissioned and funded by Lemminkäinen Infra Oy.</p> <p>The aim of this thesis was to determine whether jet grouting is a suitable method for repairing the settlement problems of railway embankments. The method is compared with other current repairing methods. The objective of this research was to get acquainted with the jet grouting method and the function of the pile cap foundation through a literature review. Additionally, another objective was to establish possible difficulties and challenges facing the grouting project when working on the setting of an operational railway. This was done by studying literature and examining a case study. A further aim was to determine the possible need for follow-up research.</p> <p>This study examined pile cap foundations to gain understanding of the settlement problems of the railway embankments. Uneven settlements occur when the arching of the embankment fails. Consequentially the operation of the rail traffic is disturbed and the need for maintenance increases. Moreover, the study aimed at determining the benefits and disadvantages of using the jet grouting. This was done by first introducing the jet grouting method in general, after which the special circumstances of an operational railway were explained. Literature review was also used as the method for these parts of the study. Grouting in a cramped space next to a busy railroad with no traffic breaks challenges the contractor. The investigation for the case study provided a wealth of valuable information about the in-situ.</p> <p>The following observations were made: jet grouting is a suitable method for repair of high railway embankments. The use of this method enables the creation of a soil concrete slab above the pile caps with no traffic breaks and therefore without large traffic costs. In addition, the result of the repair is permanent. However, this method requires an investigation of the position of the pile caps, and fulfilling of the empty spaces below the pile caps before the actual grouting work. The case study showed that the greatest difficulty on the site was the softening of the embankment, due to which the grouting pressure had to be decreased and the columns turned out to be smaller than expected. A crucial future recommendation was that a few test columns should be grouted before the final determination of the grouting parameters is pursued. This way the behaviour of the embankment can be observed in advance and hence the chances of a successful slab structure can be improved.</p>			

Alkusanat

Tämä työn on tilannut ja rahoittanut Lemminkäinen Infra Oy. Diplomityö on tehty Teknillisen Korkeakoulun Rakenne- ja Rakennustuotantotekniikan laitoksella professori Olli Ravaskan valvonnassa.

Rakentavasta palautteesta ja innostavasta otteesta haluan esittää parhaimmat kiitokseni diplomi-insinööri Annina Peisalle, joka on ohjannut työtäni Lemminkäinen Infra Oy:stä. Professori Ravaskaa kiitän lämpimästi mielenkiinnosta työtäni kohtaan ja ymmärryksestä työn kirjoittamisvaiheessa. Jouko Viitalalle kiitokset diplomityön aiheesta ja sujuvista järjestelyistä.

Lisäksi haluan kiittää sydämellisesti äitiäni Terttua lapsenhoitoavusta ja aviomiestäni Akia korvaamattomasta tuesta läpi diplomityöprosessin ja muutenkin elämässä. Suurkiitokset myös muusalleni Ellalle kaikesta kärsivällisyydestä ja ymmärryksestä.

Espoossa, 8.6.2009

Laura Ranin

Symbolit

a	paalujen välinen etäisyys
a_i	i:n pyörän suhteellinen paino
A	paaluhatun sivumitta
A_o	onton sylinterin poikkileikkausala
A_i	paaluhatun pinta-ala
A_j	jakautumisalue
A_p	holvautumisaste
b	paaluhatun sivun pituus; paaluväli
B	paaluhatun peittoalueen sivumitta
C	paaluhattujen vapaa väli
d	paalukoko (sivumitta)
D_i	sisäpuolisen pilarin halkaisija
F	liukupinnan kitka
h	penkereen korkeus
h_e	yhtäsuuren painuman taso
H	penkereen korkeus; paaluhatun korkeus
k	kerroin
ΔK	paalukuorman lisäys
K_o	maan lepopaineen vakio
m	paaluhatun alan suhde paaluhatun ja ulkopuolisen sylinterin yhteenlaskettuun poikkileikkausalaan; junayksikön pyörien lukumäärä
n	jännityksen keskitysluku; paalun kantaman kuormituksen osa; paalujen lukumäärä
p_{ave}	keskimääräinen paaluhatun yläreunaan kohdistuva paine
p_{ave}^{ff}	paaluhatun yläreunan tasolla vapaassa kentässä vaikuttava keskimääräinen paine
p_b	luukun päällä mitattu paine
p_r	perusmaahan kohdistuva paine
P	paalukuorma
P_o	pystysuuntainen jännitys ulkopuolisessa sylinterissä
P_F	akselikuormasta johtuva paalukuorma
P_i	pystysuuntainen jännitys sisäpuolisessa pilarissa
$P_{lyhytaik}$	vaikutusajaltaan lyhytaikaiset paalukuormat
P_{neg}	paalun negatiivinen vaippahankaus
$P_{pitkäaik}$	vaikutusajaltaan pitkäaikaiset paalukuormat
P_{sall}	sallittu paalukuorma; paalun geotekninen kantavuus

q	liikennekuorma
q_o	tasainen kuormitus penkereen päällä
Q	penkereen pinnalla vaikuttava pistekuorma
R	etäisyys pistekuorman vaikutuskohdasta tarkastelukohtaan
S	liikennekuorman lisäkuorma
S_o	ulkoisen sylinterin kokoonpuristuma
S_{3d}	jännityksen vähenemisluku
S_e	maaperän ja paalun painumaero
S_i	sisäpuolisen pilarin kokoonpuristuma
W_p	paalun siirtymä
W_s	maaperän siirtymä
γ	pengertäytteen tiheys
γ_{bk}	betonin tiheys
γ_c	pengertäytteen tiheys
γ_F	liikennekuorman osavarmuuskerroin
γ_{mk}	maan tiheys
ξ	paineenkeskityskertoimesta riippuva kerroin
ρ	holvautumisaste
σ_p	paaluhatun yläpintaan kohdistuva paine
σ_s	keskimääräinen paine perusmaassa
σ_{sall}	paalulle sallittu geotekninen kantavuus
φ_c	pengertäytteen kitkakulma
ϑ	säteen R suuntakulma
\varnothing_d	jakautumiskulma

Lyhenteet ja käsitteet

Aukean tilan ulottuma (ATU)	Rautatieliikenteen ympärilleen tarvitsema vapaa tila, jonka sisäpuolella ei saa olla kiinteitä rakenteita eikä laitteita.
Holvautuminen	Paaluhattujen välisen maan lujittuminen.
km (ratakilometri)	Nimetty määrämittainen osuus, jonka pituus on kahden peräkkäisen kilometripylvään väli raidetta pitkin. Ratakilometrin pituus voi poiketa 1000 metristä.
Liete	Suihkuinjektointiprosessissa ylijäänyt maa-ainespartikkeleiden ja sementtisuspension seos, joka virtaa maan pinnalle porareian kautta.
Paaluhatturakenne	Erillisten paaluilla perustettujen paaluhattujen muodostama rakenne, joka muodostuu paaluhattuista ja paaluista sekä hattujen päälle ja väliin rakennettavasti kuormaa jakavasta kerroksesta.
Porakruunu	Suihkuinjektointijohteen alapäähän kiinnitetty työkalu, jossa sijaitsevien suuttimen/suutinten kautta suihkutetaan sideainesuspensio, ilma ja vesi maahan.
Raidevaraus	Junaliikenteen keskeytys tietyllä raiteella tai raiteistolla työskentelyn ajaksi.
Sideainesuspensio	Sideaineen (yleensä sementin) ja veden sekoitus, joka suihkutetaan korkeapaineisena maahan ja jonka kanssa hajotettu maa-aines sekoittuu.
Suihkuinjektointi	Menetelmä, jossa maa-aines hajotetaan ja osittain syrjäytetään suuntaamalla maakerrokseen pieniläpimittainen, korkeapaineinen suihku. Suihku- tuksessa käytetty sideainesuspensio sekoittuu hajotettuun maa-ainekseen.
Suihkuinjektointijohde	Suihkuinjektointilaitteistoon kuuluvat yhteen liitetty tangot, joiden kautta sideainesuspensio kuljetetaan porakruunuun.
Suutin	Porakruunuun kiinteästi asennettu erikoisvalmisteen laite, joka on suunniteltu muuntamaan suihkuinjektointijohteen korkeapainevirtaus maahan suunnatuksi suurnopeussuihkuksi.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SYMBOLIT	5
LYHENTEET JA KÄSITTEET	7
1 JOHDANTO	10
1.1 TUTKIMUKSEN TAUSTAA	10
1.2 TUTKIMUSONGELMA.....	11
1.3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA RAJAUKSET	12
2 PAALUHATTURAKENNE.....	13
2.1 PAALUHATTURAKENTEEN TOIMINTAPERIAATE	13
2.2 PENKEREEN HOLVAUTUMISASTE	14
2.2.1 Kovan pohjan varaan perustetut paaluhattupenkereet	14
2.2.2 Pehmeän pohjan varaan perustetut paaluhattupenkereet	16
2.3 PAALUHATTURAKENTEIDEN SUUNNITTELU.....	20
2.4 PAALUHATTURAKENTEEN ONGELMAT LIIKENTEEN ALAISELLA RAITEELLA	40
2.5 PAALUHATTURAKENTEIDEN PAINUMAONGELMIEN NYKYISET KORJAUSMENETELMÄT	41
2.5.1 Keveät ja raskaat korjausmenetelmät.....	41
2.5.2 Paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttö	41
2.5.3 Teräsponttien lyöminen vaakaan paaluhattujen yläpuolelle	42
2.5.4 Stabilointielementtien asentaminen paaluhattujen yläpuolelle.....	43
2.5.5 Lujiteverkkojen ja –kankaiden käyttö sekä teräsbetoni- laatan asennus paaluhattujen yläpintaan	44
3 SUIHKUINJEKTOINTI	45
3.1 SUIHKUINJEKTOINTIMENETELMÄ	45
3.2 SUIHKUINJEKTOINNISSA KÄYTETTÄVÄ LAITTEISTO JA SUIHKUINJEKTOINTITYÖN TOTEUTUS	47
3.2.1 Suihkuinjektointilaitteisto	47
3.2.2 Yksittäis-, kaksois- ja kolmoisjärjestelmä	49
3.2.3 Suihkuinjektoinnin työvaiheet	50
3.3 SUIHKUINJEKTOINTIPARAMETRIT JA SUIHKUINJEKTOINTITYÖN LAADUNVALVONTA	52
3.3.1 Suihkuinjektointiparametrit	52
3.3.2 Suihkuinjektointityön laadunvalvonta	52
3.3.3 Suihkuinjektointiparametrien vaikutus pilarin läpimittaan ja lujuuteen....	53

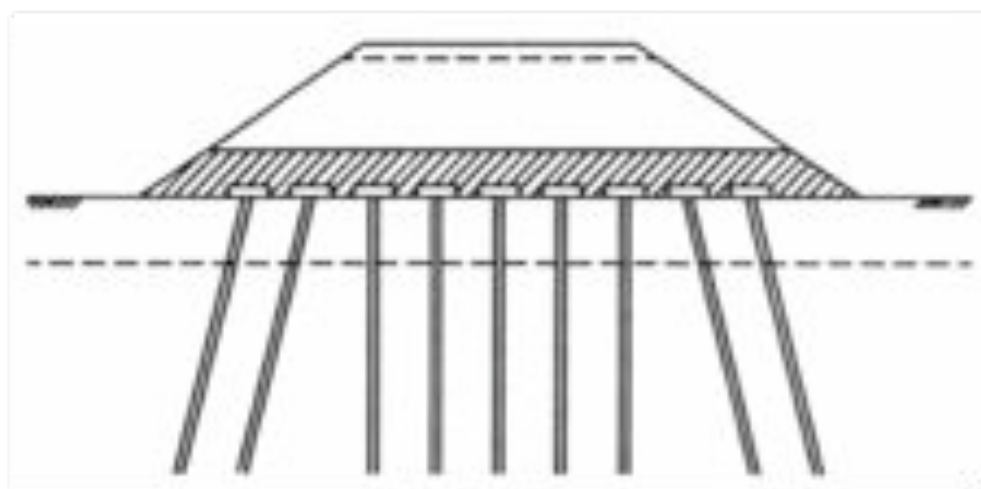
3.4	SUIHKUINJEKTOINTIMENETELMÄN SOVELTUVUUS JUNARATOJEN PAINUMISONGELMIEN KORJAAMISEEN	56
3.4.1	<i>Työskentely liikenteen alaisella raiteella</i>	56
3.4.2	<i>Suihkuinjektoitu rakenne ratapenkereessä.....</i>	56
3.4.3	<i>Suihkuinjektoidusta rakenteesta aiheutuvat kustannukset</i>	57
3.4.4	<i>Suihkuinjektointimenetelmän edut ja haitat junaratojen painumaongelmien korjaamisessa</i>	57
4	CASE: PAALUHATTUJEN KORJAUSKOE RATAOSUUEDELLA VUOHIMÄKI-KELA	60
4.1	KOECOHTTEEN KUVAUS.....	60
4.2	TYÖN TOTEUTUS	62
4.2.1	<i>Koekohteessa käytetty suihkuinjektointilaitteisto.....</i>	62
4.2.2	<i>Esivalmistelut</i>	62
4.2.3	<i>Suihkuinjektointi.....</i>	64
4.3	TULOKSET.....	69
4.3.1	<i>Suihkuinjektoitu rakenne</i>	69
4.3.2	<i>Pilareista poratut näytteet</i>	70
4.3.3	<i>Koekohteen suihkuinjektoinnissa havaitut ongelmat</i>	71
4.3.4	<i>Lopputulos</i>	72
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	74
	LÄHTEET	78
	LIITE 1	
	LIITE 2	
	LIITE 3	
	LIITE 4	
	LIITE 5	
	LIITE 6	
	LIITE 7	
	LIITE 8	

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen taustaa

Suomessa rautateiden rakentaminen alkoi 1860-luvulla, ja nykyään liikennöidyn rataverkon pituus on 5794km. 1900-luvun puoliväliin asti ratojen perustamista ei kontrolloitu pohjarakennusnormein, joten suurin osa rautateistä perustettiin maanvaraisesti tai puuarinoiden varaan (Mikkonen 2005, RIL 1995). Rautatieliikenteen kehittyminen vuosien saatossa toi mukanaan kasvaneet ajonopeudet ja juna-akuormat, ja myös rataverkon ulottaminen vaikeasti rakennettaville pehmeikköalueille edellytti vakaita perustuksia. (Jääskeläinen & Rathmayer 1975, Mikkonen 2005, RHK 2008a)

Ruotsin esimerkin innoittamana alettiin rautatiepenkereiden perustamiseen käyttää 1970-luvulta alkaen paaluhatturakenteita, mikä mahdollisti ratojen perustamisen kovan alustan varaan pehmeiköille. Paaluhatturakenteessa juna- ja pengerkuorma välittyvät paalujen yläpäähän asennettujen teräsbetonista valmistettujen paaluhattujen kautta paaluille, ja paaluilta kantaviin maakerrokseen. (RHK 2006) Paaluhatturakenteeseen voidaan lukea paalujen, paaluhattujen ja niiden väliin rakennettavan kuormaa jakavan kerroksen lisäksi mahdolliset lujitteet, joiden tarkoituksena on estää täyttömateriaalin valuminen paaluhattujen väliseen rakoon raskaiden, dynaamisten kuormitusten vaikuttaessa. Lujitteina käytetään suodatin-kankaita sekä teräksisiä ja synteettisiä lujiteverkkoja. Paaluhatturakenne on esitetty kuvassa 1. (Kujala 2005, Tiehallinto 2001)



Kuva 1: Paaluhatturakenne Tiehallinnon (2001) mukaan. Rasteroinnilla on osoitettu kuormaa jakava kerros.

Paaluhatturakenteiden toiminnassa huomattiin ajan myötä vakavia ongelmia, joten nykyään niiden käytöstä on luovuttu joitakin erityistapauksia lukuun ottamatta. (Mikkonen 2005, RHK 2006). Olemassa olevien paaluhatturakenteiden painuma-ongelmia ratkaistaessa on huomioitava liikenteen alaiselle raiteelle ominaiset haasteet, kuten erityiset työturvallisuusjärjestelyt sekä mahdolliset liikennekatkot ja niistä aiheutuvat suuret taloudelliset tappiot. Lisäksi on tärkeää selvittää korjausmenetelmien välitön vaikutus ratapenkereen stabiliteettiin ja raiteiden liikkeisiin. (RHK 2007a)

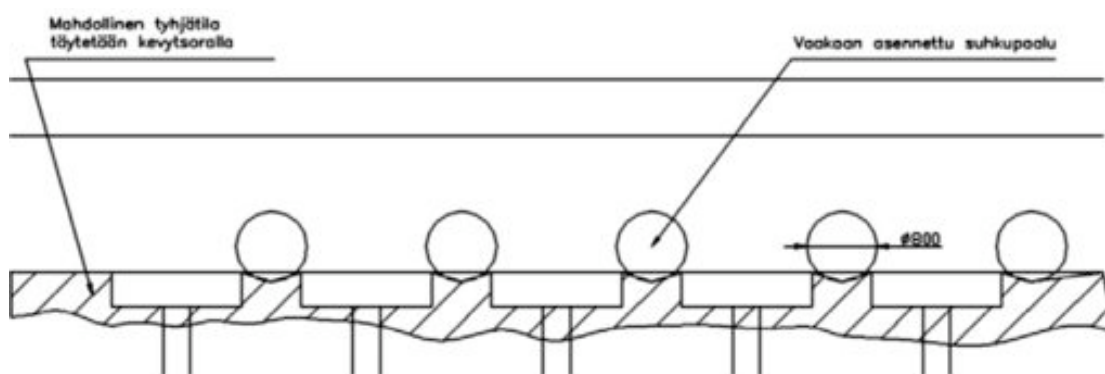
1.2 Tutkimusongelma

Paaluhatturakenteiden toiminta pehmeiköllä perustuu hattujen välisen maa-aineksen lujittumiseen kuormituksen alla. Tätä lujittumisprosessia kutsutaan penkereen holvautumiseksi. (Jääskeläinen & Rathmayer 1975) Käytännössä on huomattu, että paaluhattujen välisen maa-aineksen holvautuminen ei ole toiminut kaikissa olosuhteissa toivotulla tavalla, ja holvautumisen epäonnistuessa on paaluhattujen alle muodostunut tyhjätiloja. Pengermateriaali on valunut tyhjätiloihin, jolloin paaluhattujen tuenta on häiriintynyt, ja sen seurauksena ovat paaluhattujen päässeet kallistumaan. (Mikkonen 2005, Tiehallinto 2003) Paaluhattujen kallistumisesta ja pengermateriaalin valumisesta tyhjätiloihin aiheutuu rataliikennettä häiritseviä ja kunnossapidon tarvetta lisääviä painumia ratapenkereeseen (RHK 2006).

Syynä holvautumisen epäonnistumiseen voidaan pitää liikenteen alaiselle raiteelle tyypillisiä olosuhteita. Junaliikenteestä aiheutuva värinä, runsaat sateet, sekä veden jäätyminen ja sulaminen pakkaskauden aikana edistävät holvautumisen purkautumista tehokkaasti. (Kujala 2005, RHK 2006)

Ratahallintokeskuksen vuonna 2006 tuottamassa raportissa ”Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus” on esitetty nykyiset paaluhattualueiden kunnostus ja korjausmenetelmät. Paaluhattujen alapuolisiin tyhjätiloihin on puhallettu kevytsoraa, ja paaluhattujen yläpuolelle on asennettu vaakasuuntaisia teräspontteja, jotta maan valuminen paaluhattujen väleistä estyisi. Nämä korjaustoimenpiteet ovat sallineet raideliikenteen jatkumisen suuremmitta häiriöittä, mutta kevytsorapuhalluksen korjausvaikutus on ollut varsin lyhyt. Lisäksi järeämpänä korjauskeinona on käytetty stabilointielementtien asentamista paaluhattujen päälle, mikä on edellyttänyt ratarakenteiden purkamista ja raideliikenteen katkaisua. Elementit estävät pengermateriaalin valumisen hattujen alapuolelle muodostuviin tyhjätiloihin tehokkaasti, mutta raiteen purkaminen aiheuttaa huomattavia liikennehaittakustannuksia, ja työ edellyttää pitkiä raidevarauksia.

Stabilointielementtimenetelmällä korjattujen rataosuuksien tarkasteluista saadut hyvät tulokset kannustavat kehittämään menetelmiä, joilla paaluhattujen painumista aiheutuvat ongelmat saataisiin ratkaistua pysyvästi ja raideliikenteen häiriintymättä. Kehitettävänä korjausmenetelmänä Ratahallintokeskuksen raportissa mainitaan paaluhattujen yläpuolelle tehtävät vaakasuuntaiset, toisiaan leikkaavat suihkupilarit, jotka muodostavat kovetuttuaan yhtenäisen laattarakenteen paaluhattujen yläpuolelle ja estävät täten maa-aineksen valumisen hattujen välistä. Jos paalurivien tarkat sijainnit ovat tiedossa, voidaan vaakasuuntaiset suihkupilarit tehdä myös paalurivien väleihin (kuva 2).



Kuva 2: Vaakasuuntaiset suihkupilarit paalurivien väleissä. (RHK 2006)

1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella suihkuinjektointimenetelmän soveltuvuutta junaratojen painumaongelmien korjaamiseen. Tarkastelussa suihkuinjektointimenetelmää verrataan muihin käytössä oleviin korjausmenetelmiin. Painumaongelmien ymmärtämiseksi tutustutaan tutkimuksessa ensin paaluhattupenkereen toimintatapaan ja suunnittelukriteereihin. Suihkuinjektointimenetelmään ja paaluhattupenkereiden toimintaan perehdytään kirjallisuuskatsauksella.

Liikenteen alaisella raiteella työskenteleminen tuo tiettyjä haasteita ja rajoitteita itse suihkutustyöhön. Tutkimuksessa tarkastellaan kesällä 2007 toteutettua koekohdetta. Koekohteen ja kirjallisuuden avulla pyritään selvittämään mahdollisia työnaikaisia ongelmia ja haasteita, joita junaradalla toteutettavassa suihkutustyössä voi ilmetä. Lisäksi tutkimuksessa pyritään kartoittamaan mahdollinen jatkotutkimuksen tarve.

Tutkimuksessa keskitytään raideliikenteen alaisiin paaluhatturakenteisiin ja niissä ilmenneiden painumaongelmien korjaamiseen. Muut rakenteet jätetään tämän työn ulkopuolelle.

2 Paaluhatturakenne

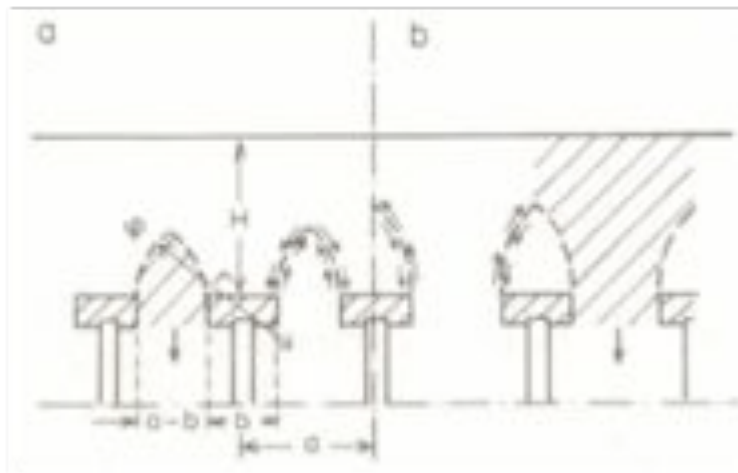
2.1 Paaluhatturakenteen toimintaperiaate

Tiehallinto (2001) määrittelee paaluhatturakenteen seuraavasti: ”Paaluhatturakenne on erillisten paaluilla perustettujen paaluhattujen muodostama rakenne. Paaluhatturakenne muodostuu paaluhatuista ja paaluista sekä hattujen päälle ja väliin rakennettavasta kuormaa jakavasta kerroksesta, jonka alaosa toimii paaluhattujen suojakerroksena.” Rakenteen tyypillisiä käyttöalueita ovat saman suunnitteluohjeen mukaan kiinteät savikot, joissa pehmeän kerroksen leikkauslujuus on riittävä estämään hattujen välissä olevan materiaalin valumista sekä tukemaan paaluja ja paaluhattuja rakentamisvaiheessa ja sen jälkeen. Tämä tarkoittaa normaalipenkereen osalta savea, jonka leikkauslujuus on vähintään 15 kPa leikkaustason alla olevan kuivakuorikerroksen ollessa vähintään 1 m paksuinen. Kuivakuoren puuttuessa tulee saven leikkauslujuuden olla vähintään 20 kPa.

Paaluhatturakenteen toiminta perustuu paaluhattujen välissä olevan maan lujittumiseen, josta käytetään jatkossa termiä holvautuminen. Holvautuminen ymmärretään kirjallisuudessa seuraavasti: paaluhattujen välissä olevalla maatytytteellä on taipumus liikkua alaspäin penkereen painosta johtuen, sillä paaluhattuperustus on käytössä vain kantavuudeltaan heikoilla maapohjilla (Jääskeläinen & Rathmayer 1975). Tätä liikettä rajoittaa osin paaluhattujen yläpuoliseen pengertäytytseen kehittyyvä leikkausvoima. Leikkausvoima kehittyy liikkuvien maapartikkeleiden ja niitä ympäröivien, paikallaan pysyvien maapartikkeleiden välille, sillä paikallaan oleva maamassa vastustaa viereisen maamassan vajoamista. Vajoavaan maamassaan kohdistuva paine siirtyy leikkausvoiman välityksellä sitä ympäröivään, paikallaan olevaan maamassaan. (Terzaghi 1936 ja 1943) Käytännössä paineen siirtyminen tarkoittaa, että penkereen painosta aiheutuva kuormitus siirtyy paaluhattujen välisestä painuvasta maamassasta paaluhattujen yläpuolisen, paikallaan pysyvän maamassan kuormitukseksi ja siitä edelleen paaluhatuille ja paaluille. Paaluilta kuormitus siirtyy maaperään paalujen ja maan jäykkyyseroista johtuen. (Chen et al. 2008)

Jääskeläisen & Rathmayerin (1975) mukaan holvautuminen toimii vain paaluhattujen ollessa riittävän suuria. Tällöin holvi muodostuu paaluhattujen väliin kuvan 3a mukaisesti, ja paaluhattujen välisen maan painuminen pysähtyy kuormituksen siirtymässä leikkausvoiman välityksellä paaluhatuille. Jos paaluhatut ovat liian pieniä penkereen korkeuteen tai paalujen väliin verrattuna, muodostuu holvi kunkin paaluhatun yläpuolelle kuvan 3b mukaisesti. Tällöin kuormitus ei siirry liikkuvalta maamassalta paaluhatuille eikä hattujen välissä oleva maa lujitu, ja tämän seura-

uksena painuminen jatkuu. Holvautumisen epäonnistuminen ilmenee epätasaisina painumina penkereen pinnalla (Han ja Gabr 2002).



Kuva 3: Paaluhattujen toimintatapa tarkasteltuna murtotilan mukaan. Liukupinnat otaksutaan kaareviksi (ympyränkaariksi). (Jääskeläinen&Rathmayer 1975)

2.2 Penkereen holvautumisaste

2.2.1 Kovan pohjan varaan perustetut paaluhattupenkereet

Terzaghi (1936) ja McNulty (1965) tutkivat holvautumista kokeellisesti asettamalla hiekkaa tasolle, johon oli tehty kapea luukku (trap door). Luukkua avattaessa paine luukun päällä väheni, mutta samanaikaisesti paine saman tason muissa osissa kasvoi. Luukkukokeellaan Terzaghi ja McNulty osoittivat leikkausvoiman kehittymisen sekä holvautumisvaikutuksen riippuvuuden pengertäytteen siirtymästä ja paksuudesta. Holvautumisprosessissa kehittynyt leikkausvoima kasvoi, kun painuvan maamassan yläpuolella sijaitsevan pengertäytteen siirtymä tai penkereen paksuus kasvoi. Matemaattista riippuvuutta holvautumiseen vaikuttavien tekijöiden välillä kuvattiin holvautumisasteella ρ (McNulty 1965):

$$\rho = \frac{p_b}{\gamma H + q_0} \quad (1)$$

p_b on luukun päällä mitattu paine

γ on pengertäytteen tiheys

H on penkereen korkeus

q_0 on tasainen kuormitus penkereen päällä

Holvautumisaste $\rho=1$ edustaa tapausta, jossa holvautumista ei tapahdu lainkaan ja holvautumisaste $\rho=0$ edustaa tapausta, jossa penger on täysin holvautunut.

Low et al. (1994) kuvasivat paaluhatturakenteen varaan perustetun penkereen holvautumista jännityksen vähenemisluvulla (stress reduction ratio) S_{3d} , mikä saatiin laskettua kaavalla:

$$S_{3d} = \frac{p_r}{\gamma H} \quad (2)$$

p_r on perusmaahan kohdistuva paine

γ on pengertäytteen tiheys

H on penkereen korkeus

Jännityksen vähenemisluvun vaihteluväli on McNultyn holvautumisasteen tapaan 0...1. Lowen et al. tutkimuksen perusteella voidaan penkereen holvautumista parantaa geovahvisteen käytöllä, ja muita holvautumisprosessiin vaikuttavia tekijöitä ovat paaluhattujen pinta-alan ja keskinäisen etäisyyden valinta.

Dancygieri & Yankelevsky (1994) puolestaan tutkivat holvautuvan rakenteen päälle lisätyn pehmeän kerroksen vaikutusta penkereen holvautumisasteeseen. Tutkimuksessaan he määrittivät penkereen holvautumisasteen (A_p) keskimääräisen paaluhatun yläreunaan kohdistuvan paineen ja samalla tasolla vapaassa kentässä vaikuttavan keskimääräisen paineen suhteena seuraavasti:

$$A_p(\%) = \frac{p_{ave}}{p_{ave}^{ff}} \cdot 100 \quad (3)$$

p_{ave} on keskimääräinen paaluhatun yläreunaan kohdistuva paine

p_{ave}^{ff} on samalla tasolla vapaassa kentässä vaikuttava keskimääräinen paine

Han & Gabr (2002) kuvasivat penkereen holvautumista vastaavalla tavalla, mutta heidän tutkimuksessaan käytettiin termiä jännityksen keskitysluku n (stress concentration ratio).

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \quad (4)$$

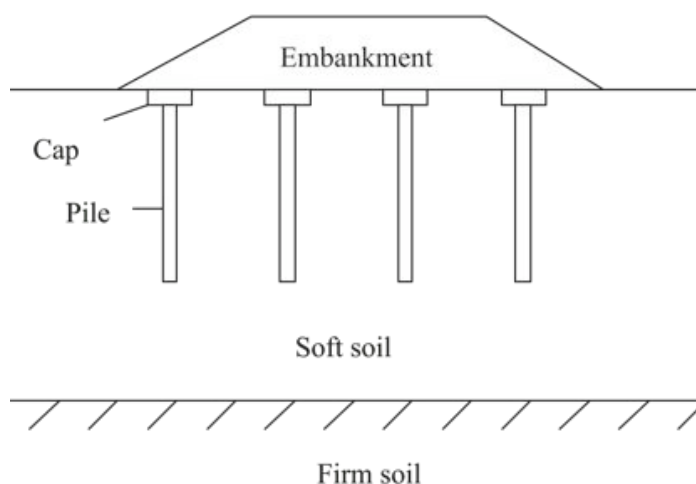
σ_p on paaluhatun yläpintaan kohdistuva paine

σ_s on keskimääräinen paine perusmaassa

Tutkimuksessaan Han & Gabr osoittivat, että pengerkorkeuden ja geovahvisteen lisäksi myös paalumateriaalilla on vaikutusta penkereen holvautumiseen.

2.2.2 Pehmeän pohjan varaan perustetut paaluhattupenkereet

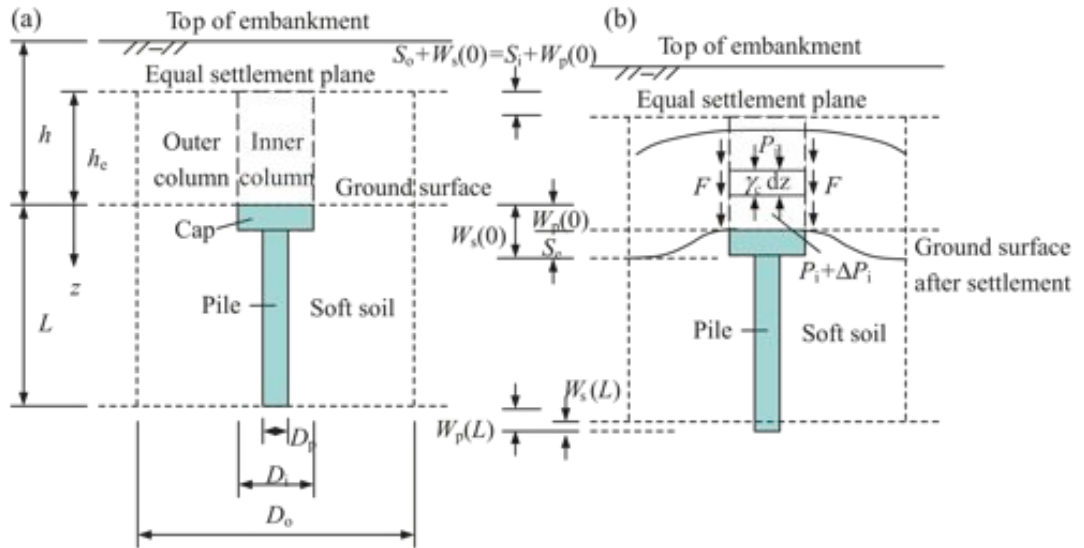
Paaluhattuperustukset joudutaan toisinaan toteuttamaan olosuhteissa, joissa paaluja ei saada ulotettua kovaan pohjaan asti (kuva 4). Tällaiseen perustustilanteeseen perehtyivät Chen et al. (2008) kehittäessään teoreettisen ratkaisun yhdessä suunnassa kuormitettujen, pehmeälle pohjalle perustettujen penkereiden suunnitteluun. Ratkaisun osana on käsitelty myös penkereen holvautumisasteen laskenta.



Kuva 4: Pehmeässä maaperässä kelluva paaluperustus. (Chen et al. 2008)

Chenin et al. kehittämän ratkaisun pohjana toimi kuvassa 5a esitetty analyyttinen malli paaluille perustetusta penkereestä, joka kelluu pehmeässä maaperässä. Mallin osat ovat paalu ja jäykkä paaluhattu, niitä ympäröivä maaperä sekä pengertäyte. Pengertäyte oletetaan homogeeniseksi, isotrooppiseksi ja koheesiottomaksi. Täytteen kitkakulma on φ_c , tiheys γ_c ja kimmokerroin E_c . Paalun, maaperän ja penkereen kuormitus on mallinnuksessa yksisuuntainen. Paalujen halkaisijaa, poikkileikkausala ja pituutta on merkitty symboleilla D_p , A_p ja L . A_i kuvaa paaluhatun poikkileikkausala. Mallissa paaluhatun yläpuolella oleva pengertäyte on jaettu sisäpuoliseen pilariin (inner column), jonka poikkileikkaus on D_i , ja ulkopuoliseen, onttoon sylinteriin (outer cylinder), jonka sisäpuolinen halkaisija on D_i ja ulkopuolinen halkaisija on D_o . Onton sylinterin poikkileikkausala on A_o . Kuvassa 5a on esitetty myös yhtäsuuren painuman taso (equal settlement plane), joka ymmärretään Terzaghin (1943) teorian mukaan seuraavasti: penkereeseen aiheutuu

painumaero, sillä paaluhattujen välinen maa painuu paaluhattuja nopeammin. Maan holvautumisesta johtuen vähenee tämä painumaero penkereen korkeussuunnassa penkereen pohjalta kohti penkereen yläreunaa saavuttaen nollatason korkeudella h_e , mikäli penger on riittävän korkea. Tätä nollatasoa kutsutaan yhtäsuuren painuman tasoksi.



Kuva 5: Analyttinen malli paaluille perustetusta penkereestä. (a) Penger ennen painumaa. (b) Penger painuman jälkeen. (Chen et al. 2008)

Penkereen holvautumista Chen et al. tarkastelevat seuraavalla tavalla kuvassa 5 havainnollistettua mallia käyttäen: Ulkopuolisen sylinterin maa-aines liikkuu alaspäin suhteessa sisäpuoliseen pilaariin, sillä ulkopuolisen sylinterin muodostava maa-aines painuu enemmän kuin paalu ja paaluhattu. Tämä liike aiheuttaa leikkausvoiman, joka vaikuttaa alaspäin sisäpuolisen pilarin pinnalla, mutta ylöspäin ulkopuolisen sylinterin pinnalla (kuva 5b). Tarkasteltaessa sisäpuolisen pilarin yksikköä, jonka paksuus on dz , ja olettaessa ettei penkereessä tapahdu sivusuuntaista muodonmuutosta, voidaan tarkasteltavan yksikön voimatasapaino pystysuorassa suunnassa kirjoittaa:

$$A_i dP_i = (\gamma_c A_i + \pi D_i F) dz \quad (5)$$

A_i on paaluhattun pinta-ala

P_i on pystysuora jännitys sisäpuolisessa pilarissa

D_i on sisäpuolisen pilarin halkaisija

F on liukupinnan kitka

Laskennallisesti liukupinnan kitka saadaan määritettyä maan lepopaineen vakion K_0 avulla kaavoilla (6) ja (7).

$$F = P_i K_0 \tan \varphi_c \quad (6)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi_c \quad (7)$$

K_0 on maan lepopaineen vakio

φ_c on pengertäytteen kitkakulma

Holvautumistarkastelu Chenin et al. tutkimuksessa jatkuu korkeustasossa $z = -h_e$, missä sisäpuolisen pilarin pystyjännitys saa arvon $P_i = \gamma_c(h - h_e)$. Integroitaessa yhtälö (5) korkeustasosta $z = -h_e$ korkeustasoon $z = 0$ saadaan sisäpuolisen pilarin pystyjännitykselle lauseke:

$$P_i(z) = \frac{\gamma_c D_i}{4 K_0 \tan \varphi_c} \left\{ \left[1 + \frac{4 K_0 \tan \varphi_c}{D_i} (h - h_e) \right] \exp \left(4 K_0 \tan \varphi_c \frac{z + h_e}{D_i} \right) - 1 \right\} \quad (8)$$

kun $(-h_e \leq z \leq 0)$

γ_c on pengertäytteen tiheys

h on penkereen korkeus

h_e on yhtäsuuren painuman taso

Yhtälössä (8) esiintyvä korkeus h_e on ainoa tuntematon, ja se voidaan määrittää paalun ja maan väliseen painumaeron perusteella korkeustasolla $z = 0$.

Seuraava vaihe penkereen Chenin et al. holvautumistarkastelussa on penkereessä vaikuttavien pystysuorien voimien tasapainon tarkastelu. Tarkastelun perusteella voidaan kirjoittaa tasapainoehto:

$$m P_i(z) + (1 - m) P_o(z) = \gamma_c (h + z) \quad \text{kun} \quad (-h_e \leq z \leq 0) \quad (9)$$

m on paaluhatus alan suhde paaluhatus ja ulkopuolisen sylinterin yhteenlaskettuun poikkileikkausalaan

P_i on pystysuuntainen jännitys sisäpuolisessa pilarissa

P_o on pystysuuntainen jännitys ulkopuolisessa sylinterissä

Voimien tasapainotarkastelun jälkeen on tutkimuksessa määritetty penkereen holvautumisaste, joka tarkoittaa Chenin et al. mallinnuksessa paalun kantaman kuormituksen osaa n . Paalun kantaman kuormituksen osa on laskennallisesti

määritetty paaluhatun kantaman kuorman suhteena koko aluetta (sisäpuolisen pilarin ja ulkopuolisen sylinterin muodostama alue) kuormittavan pengertäytteen painoon.

$$n = \frac{P_i(0)A_i}{\gamma_c h(A_0 + A_i)} = \frac{mP_i(0)}{\gamma_c h} \quad (10)$$

n on paalun kantaman kuormituksen osa

A_0 on onton sylinterin poikkileikkausala

Koska yhtä suuren painuman tasolla ei ilmene painumaeroa sisäpuolisen pilarin ja ulkopuolisen sylinterin välillä, ovat ulkopuolisen sylinterin ja sisäpuolisen pilarin painumat yhtä suuret:

$$S_i + W_p(0) = S_0 + W_s(0) \quad (11)$$

S_i on sisäisen pilarin kokoonpuristuma

W_p on paalun siirtymä

S_0 on ulkoisen sylinterin kokoonpuristuma

W_s on maaperän siirtymä

Yhtälö (11) on Chenin et al. ratkaisussa vielä kirjoitettu auki muotoon:

$$\begin{aligned} S_e = S_i - S_0 = W_s(0) - W_p(0) &= \int_{-h_e}^0 \frac{P_i(z) - P_0(z)}{E_c} dz = \left(1 + \frac{A_i}{A_0}\right) \frac{\gamma_c D_i^2}{16K_0 \tan^2 \varphi_c E_c} \\ &\times \left[\left[1 + \frac{4K_0 \tan \varphi_c}{D_i} (h - h_e) \right] \times \left\{ \left[\exp \left(4K_0 \tan \varphi_c \frac{h_e}{D_i} \right) - 1 \right] - h_e \right\} \right. \\ &\left. + \frac{\gamma_c}{E_c} \left(1 + \frac{A_i}{A_0} \right) \left(\frac{h_e^2}{2} - hh_e \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

S_e on maaperän ja paalun painumaero

Yhtälö (12) esittää yhtäsuuren painuman tason h_e ja painumaeron S_e yhteyden. Jos korkeus h_e määritetään käyttämällä yhtälöä (12), voidaan sisäpuolisen pilarin pystysuora jännitys $P_i(z)$, ulkopuolisen sylinterin pystysuora jännitys $P_0(z)$ ja n laskea käyttämällä yhtälöitä (8), (9) ja (10).

Yhtälöllä (10) laskettava paalun kantama kuormituksen osa n kuvaa penkereen holvautumisastetta. Ääritapauksissa $n = 0$ on maa täysin holvautunut, ja $n = 1$ ei

holvautumista ole tapahtunut lainkaan. Tutkimuksen mukaan riippuu paalun kantama kuormituksen osa n paalun ja maan välisistä painumaeroista, pengertäytteen ominaisuuksista, penkereen korkeudesta, käytetystä paaluvälistä ja paaluhattujen koosta. Chenin et al. tutkimuksessa määritetty yhtälö holvautumisasteen laskemiseksi muistuttaa paljolti Lowen et al. (1994) määrittämää jännityksen vähenemislukua.

Yllä esitetyt yhtälöt ovat paikkansapitäviä vain tilanteissa, joissa penger on vähintään yhtäsuuren painuman tason korkuinen ($h \geq h_e$). Chenin et al. tutkimuksessa annetaan laskennallisten pengertarkasteluiden päätteeksi suositukset pengerkorkeuden valintaan holvautumisvaikutuksen maksimoimiseksi. Heidän mukaansa tulee rakennettavan penkereen korkeus valita siten, että se on vähintään 1.2 kertaa paalujen keskeltä keskelle etäisyys, jotta haitallisen suurilta painumaeroilta penkereen pinnalla välttyttäisiin. Vaihtoehtoisesti voidaan myös valita paaluetäisyys siten, että paalujen keskeltä-keskelle välimatka on pienempi kuin 0.8 kertaa pengerkorkeus h .

2.3 Paaluhatturakenteiden suunnittelu

Rautatierakentamisessa on Suomessa ollut käytössä useita paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeita vuosien saatossa. Niin Tiehallinto kuin Ratahallintokeskus ovat julkaisseet omia ohjeitaan, ja ennen 1970-lukua käytettiin samoja ohjeita sekä teillä että rautateilla pengerpaalutusten suunnittelussa. Pengerpaalutuksen suunnittelun historiaa Suomessa on käsitelty Jari Maran diplomityössä ”Puupaaluilla perustettujen tierakenteiden vauriot ja korjausmenetelmät” (2000) sekä Terhi Mikkosen diplomityössä ”Pengerpaalurakenteet liikenteen alaisella raiteella” (2005). Seuraavassa esitellään eri vuosikymmeninä noudatettuja suunnitteluperiaatteita.

Ennen 1960-luvun alkua:

Pengerpaalutuksissa ei käytetty paaluhattuja, ja käytössä olleet puupaalut mitoitettiin vain jäännöskuormalle, jota maapohja ei itse pystynyt kantamaan. Joissakin kohteissa käytössä olivat puuarinat, joilla parannettiin pengerkuorman siirtymistä paaluille. (Mara 2000, Mikkonen 2005)

1960-luvun alusta lähtien:

Pengerpaalutus toteutettiin tierakentamisessa käyttäen puupaaluja ja betonisia paaluhattuja. Rautateilla eivät paaluhatturakenteet olleet vielä käytössä. Paalut mitoitettiin ottamaan vastaan koko pengerkuorma, ja niiden sallittuna geoteknisenä kantavuutena käytettiin aluksi 5 MPa, myöhemmin 8 MPa ja lopuksi 7,5 MPa. Paalun kantavuus määritettiin paalun kärjen pinta-alan mukaan. Näillä suunnittelu-

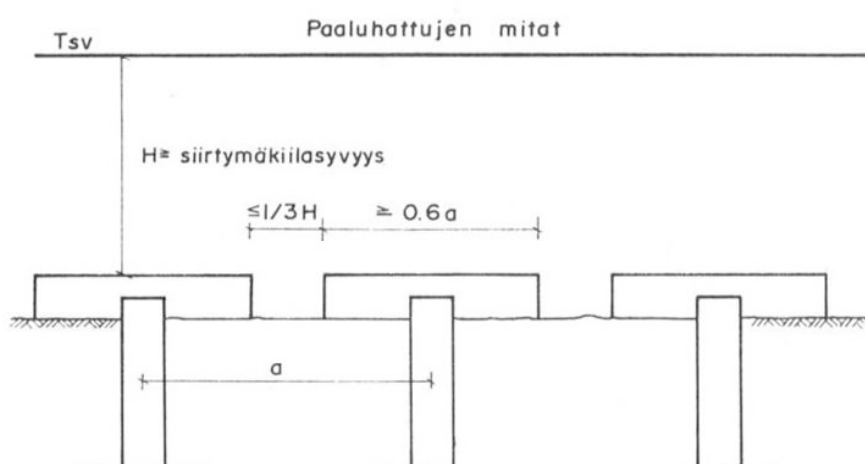
kriteereillä toteutetut paaluhatut osoittautuivat myöhemmin monin paikoin liian pieniksi, erityisesti matalissa penkereissä. (Mara 2000, Mikkonen 2005)

1970-luvulla:

1970-luvulla yleistyivät paaluhatturakenteet Suomessa rautateiden perustusmenetelmänä, ja tämän seurauksena syntyi tarve tarkemmille suunnitteluohjeille. 1970-luvun alussa toteutettiin paaluhatturakenteiden suunnittelu Tie- ja vesirakennushallituksen julkaisun ”Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, Osa IV, 1972” mukaan (TVH 1972). Ohje määrittää pengerpaalutuksessa käytettäviksi paalutyypeiksi kovaan pohjaan lyötävät tukipaalut sekä kitka- ja koheesiopaalut. Paalumateriaaleista käytettäväksi suositellaan puuta. Teräsbetonipaalujen käyttö on ohjeen mukaisesti suositeltavaa vain sellaisissa penkereenosissa, joissa puupaalujen käyttö ei rakenteellisten vaatimusten, suurten paalukuormien tai lahoamisvaaran vuoksi tule kysymykseen. Paaluperustuksen mitoitus on ohjeessa esitetty tehtäväksi seuraavasti:

Penkereen mitoituskuormat	<ul style="list-style-type: none"> • Penkereen omapaino • Liikennekuorma tavallisesti 1 t / m²
Paalutiheys	<ul style="list-style-type: none"> • Sallitun paalukuorman perusteella • Paalutyypistä riippumatta paaluväli 1...2 m
Sallittu kuorma, paalupituus ja paalukoko	<p><i>Tukipaalut:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kuormituksen oletetaan siirtyvän kokonaisuudessaan paalun alapään kautta tukipohjaan • Sallittu paalukuorma = paalun alapään poikkipinta-ala x paalulle sallittu jännitys • Paalun pituus vähintään 3 m • Puisten tukipaalujen latvaläpimitta vähintään 5” ja betoni-paalujen suositeltava koko 20 cm x 20 cm <p><i>Kitkapaalut:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mitoituksessa huomioidaan paaluaineksille sallitun jännityksen lisäksi maapohjalle sallittava kuormitus. Kitkamaan kokoonpuristumista ei huomioida. • Sallittu paalukuorma = latvaläpimitaltaan samankokoisen tukipaalun sallittu paalukuorma.

	<ul style="list-style-type: none"> • Paalupituuden määrittäminen sallitun paalukuorman ja vaippapinta-alan perusteella siten, että varmuus maapohjan murtumista vastaan riittävä (mitoitusvarmuus 2...4) <p><i>Koheesiopaalut:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sallitun paalukuorman määrittäminen paalun ja sitä ympäröivän maan rajapinnassa sallittavan leikkausjännityksen perusteella. • Sallittu paalukuorma = sallittu jännitys x paalun kantavan osan vaippapinta-ala. • Leikkausjännitystä laskettaessa varmuuskerroin 2...3 (jos leikkauslujuus määritetty siipikairauksella tai laboratorio-kokein) tai 1,5...2 (koekuormitus). Tiheässä ($< 1 \text{ m}$) paalukentässä tutkittava myös paaluryhmien vajoamisvaara.
Paaluhattujen mitoitus	<ul style="list-style-type: none"> • Pengerkuorma siirretään paalukenttään neliönmuotoisten, teräsbetonista valmistettujen paaluhattujen välityksellä • Paaluhattun koko valitaan ohjeistavan kuvan mukaisesti (kuva 6). • Paaluhattujen väli riippuu ainoastaan pengerkorkeudesta (H). Tavallisimmat paaluhattutyypit esitetty liitteessä 1.



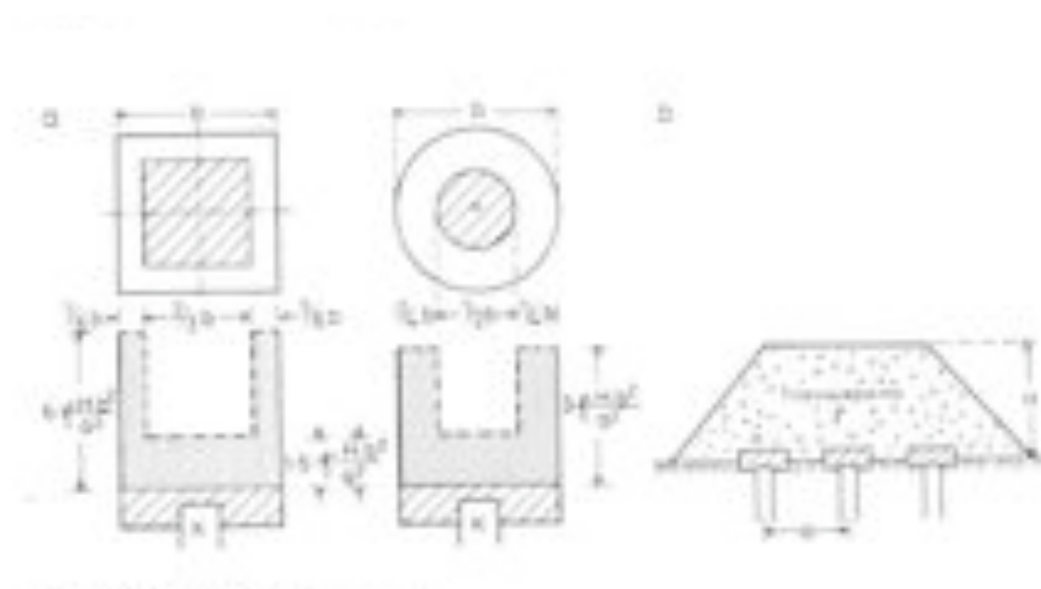
Kuva 6: Paaluhattun koon valinta Tie- ja vesirakennushallituksen ohjeen mukaan.
(TVH 1972)

TVH:n julkaisun kanssa samana vuonna ilmestyi myös lyöntipaalutusohjeet LPO-72, jonka mukaan jatkamattomille puupaaluille saatiin käyttää keskeisenä puristusjännityksenä enintään 5 MPa (LPO 1972). TVH:n ohjeessa puupaaluille sallittu jännitys oli enintään 7,5 MPa, mikäli paalupituus oli vähintään 5 m. (Mara 2000, TVH 1972)

1970-luvun puolivälissä otettiin paaluhattujen mitoituksessa käyttöön VTT:n paaluhattututkimuksen ”Paaluhattujen käyttö tie- ja rautatiepenkereissä” tulokset (Jääskeläinen & Rathmayer 1975). Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään paaluhattujen geoteknisen mitoituksen perusteet, ja suunnittelussa siirryttiin peittoprosentin käyttöön. Peittoprosentti riippui pengerkorkeuden lisäksi myös pengermateriaalista ja maapohjan kantavuudesta. Junaradoilla siirryttiin käyttämään teräsbetonipaaluja puupaalujen sijaan. Tutkimuksessa esitetyt ohjeet ja suositukset on koottu alle taulukkomuotoon.

Paaluhattujen kuormitus	<ul style="list-style-type: none"> • Paaluhattut mitoitetaan täydelle pengerkuormalle, eli pengerkuorman ei otaksuta kohdistuvan lainkaan paaluhattujen väliin • Mitoituksessa käytettävät kuormitusotaksumat pyöreille ja neliönmuotoisille paaluhatuille kuvan 7 mukaisesti • Paaluhattuun kohdistuvan maanpaineen absoluuttinen arvo riippuu hatun sivun pituudesta (b), paalujen välisestä etäisyydestä (a), penkereen korkeudesta (H) ja pengermassan tiheydestä (γ)
Liikennekuorma	<ul style="list-style-type: none"> • Pintakuorma 10 kN/m² • Liikennekuorman lisäkuorma S taulukosta 1
Paaluhattujen peittävyys	<ul style="list-style-type: none"> • Paaluhattujen peittävyiden ohjearvot eri pengerkorkeuksille taulukosta 2. Ohjearvot taulukkoon on saatu kriittisen pengerkorkeuden (eli yhtäsuuren painuman tason) raja-arvona muuttamalla hattujen rakoleveydet kyseessä olevia mittausarvoja vastaaviksi peittävyyksiksi. • Suunnittelussa on valittava sitä suurempi peittävyys, mitä huonommin kantavaa maapohja on • Pyöreiden hattujen yhteydessä voidaan taulukosta 2 käyttää lähempänä peittävyiden alarajaa olevia peittävyiden arvoja kuin neliömäisten hattujen yhteydessä

Paalujen sallittu jännitys	<ul style="list-style-type: none"> Ei uutta ohjetta, mutta paaluihin kohdistuvien kuormitusten laskuperusteiden tarkastamista suositellaan. Suositus perustuu havaintoon, että paaluhattuihin kohdistuvasta kuormasta välittyy osa paaluhattujen alapinnan kautta maapohjalle.
Paalukentän suunnittelu	<ul style="list-style-type: none"> Paalurivit limittämällä saadaan pengeralusta homogeenisemmaksi kuin asettamalla paalut suorakulmaiseen ruudukkoon Pengerluiskissa paalutuksen peittävyyttä on nostettava, mikäli paalutusta harvennetaan pengerkorkeuden laskemisesta johtuen.



Kuva 7: Paaluhattujen mitoituksessa käytettävät kuormitusotaksumat pyöreille ja neliönmuotoisille hatuille. (Jääskeläinen & Rathmayer 1975)

Jääskeläisen & Rathmayerin mukaan tulee liikennekuorman laskennassa huomioida pintakuorman 10 kN/m² lisäksi liikennekuorman aiheuttama lisäkuorma S, joka saadaan yhtälöstä:

$$S = \frac{\Delta K}{Q} = k \cdot \xi \sum_{i=1}^m a_i \frac{\cos^{\frac{\pi}{2}} \vartheta_i}{R_i^2} \quad (13)$$

ΔK on paalukuorman lisäys (MN)

Q on penkereen pinnalla vaikuttava pistekuorma (MN)

k on kerroin (m²)

ξ on paineenkeskityskertoimesta riippuva kerroin

m on junayksikön pyörien lukumäärä

a_i on i :n pyörän suhteellinen paino

R on etäisyys pistekuorman vaikutuskohdasta tarkastelukohtaan (m)

ϑ on säteen R suuntakulma

Tutkimuksessa on vertailtu, mikä pistekuorma aiheuttaa samansuuruisen kuormituslisäyksen paaluhattuun kuin yhtälöstä (13) saatava kuormituslisäys, ja tuloksena on saatu taulukossa 1 esitetyt pengerkorkeudesta riippuvat suunnitteluperusteet liikenteen mitoituskuorman huomioonottamiseksi.

Taulukko 1: Liikenteen mitoituskuormat Jääskeläisen & Rathmayerin paaluhattututkimuksessa . (Jääskeläinen & Rathmayer 1975)

Mitoituskuorma (pintakuorma) kN/m ²				
Pengerkorkeus	Tavallinen ajoneuvo- kuorma Kuormaluokka 1		Raskas erikoiskuorma I, 300kN	
(m)	sora	murskesora	sora	murskesora
1,5	22	22	39	39
2,0	14...11	13...10,5	27...21	25...20
2,5	10	10	15...12,5	17...11,5
3,0	10	10	10	10

Taulukko 2: Paaluhattujen peittävyiden ohjearvot eri pengerkorkeuksille. (Jääskeläinen & Rathmayer 1975)

Murskesora		Sora	
Pengerkorkeus H	Peittävyys C	Pengerkorkeus H	Peittävyys C
m	%	m	%
1,5...2,0	50...70	2,0...2,5	55...70
2,0...2,5	40...50	2,5...3,0	45...55
2,5...3,5	30...40	3,0...4,0	40...45
> 3,5	> 30	> 4,0	> 40

Edellä esitettyjen mitoitusohjeiden ja suositusten lisäksi käsitellään tutkimuksessa myös rautatieliikenteestä aiheutuvan kuormituksen dynaamisuuden vaikutusta penkereen holvautumiseen. Jääskeläisen & Rathmayerin mukaan liikenteen aiheuttama dynaaminen kuorma suurentaa sitä pengerkorkeutta, joka on oltava kuvassa 3a esitettyjen liukupintojen ja penkereen yläpinnan välillä, jotta paaluhattut toimisivat mitoitusoletusten mukaisesti.

Jääskeläisen & Rathmayerin tutkimus paransi rautateillä käytettävien paaluhattujen mitoitusta huomattavasti verrattuna TVH:n julkaisuun, sillä siinä esitettiin paaluhattujen mitoituskuorman laskeminen yksiselitteisesti sekä perustettavan maaperän ja maapohjan kantavuuden vaikutus paaluhattujen peittävyys. Lisäksi tutkimuksessa perehdyttiin tarkemmin paaluhattujen mitoituksessa käytettävän liikennekuorman laskemiseen ja huomioitiin junaliikenteestä aiheutuvan kuormituksen dynaamisuus. Paaluhattujen sallitun jännityksen laskemiseen eivät Jääskeläinen & Rathmayer antaneet uusia ohjeita, vaikka heidän havaintojensa mukaan välittyi osa paaluhattuihin kohdistuvasta kuormituksesta paaluhattujen alapinnan kautta maaperään. Nykyisiin ohjeisiin verrattuna oli paaluhattuvälin mitoitus tutkimuksen suurin heikkous. Jääskeläisen & Rathmayerin menetelmää käytettäessä saatettiin suurillakin paaluhattuväleillä saada penkereelle hyvä peittoprosentti, ja liian suurista hattuväleistä johtuen penkereen holvautuminen epäonnistui.

Vuodesta 1976 lähtien noudatettiin rautateiden paaluhatturakenteiden suunnittelussa julkaisussa ”Rautateiden maarakennustöiden yleinen työselitys 1976” esitettyjä ohjeita paaluhattun valinnan osalta (VR 1976). Julkaisussa esitettiin rautateillä käytettävät paaluhattut teräsbetonisille paaluille (kuva 8) ja puupaaluille (kuvat 9 ja 10). Julkaisussa ei käsitelty paaluhattujen peittävyttä, paaluvälejä, paalujen suunnittelua tai paaluhattukentän suunnittelua millään tavalla.



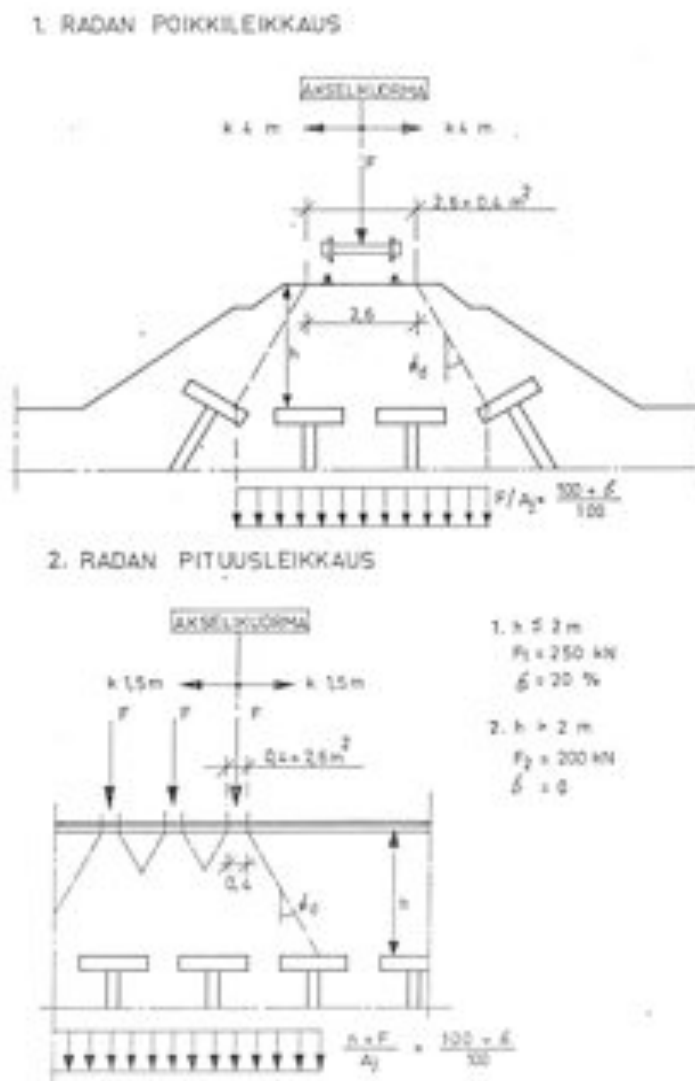
Kuva 10: Rautateillä käytettävä elementtipaaluhattu puupaaluille. (VR 1976)

Vuonna 1978 julkaistussa lisensiaatintutkimuksessa ”Tie- ja ratapenkereissä käytettävien paaluhattujen käyttöalueet ja rakenteellinen mitoitus” (Nylund 1978) pyrittiin standardisoimaan paaluhattujen koot, selvittämään eri paaluhattukokojen käyttöedellytykset ja yhdenmukaistamaan paaluhatturakenteen mitoitusmenetelmät. Seuraavassa on koottu taulukkomuotoon tutkimuksessa esitetyt ohjeet ja suositukset.

Kiskoliikenteen kuormat	<ul style="list-style-type: none"> Kiskoliikenteen kuormat lasketaan rakenteiden kuormitusnormien 1975 mukaisista veturikuormista kuvassa 11 esitetyn jakautumismallin mukaan.
Rakennekriteerit paaluhattujen varaan perustetulle ratapenkereelle	<p>Kuormakriteeri:</p> <ul style="list-style-type: none"> Sallittu jännitys paalun poikkileikkauspinta-alalle 9 MN/m^2 Sallitun paalukuorman laskenta kaavoilla (14)-(16) Sallittu paalukuorma huomioitava paalujen sijoittelussa <p>Välimaakriteeri:</p> <ul style="list-style-type: none"> Paaluhattujen välien suunnittelu siten, että maa paaluhattujen välissä ei pääse painumaan hattujen välisistä raoista

	<ul style="list-style-type: none"> • Paaluhattujen vapaan välin laskenta epäyhtälöstä (17) <p><i>Stabiliteettikriteeri:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Paaluvälien ja paaluhattukokojen valinta siten, että paaluhatun vakavuus on turvattu myös liikennekuorman epäedullisimmassa asennossa • Stabiloivan kitkavoiman tulee olla kaatavaa omapainoa suurempi epäyhtälön (18) mukaisesti
Paaluhatun mitoitus	<ul style="list-style-type: none"> • Paaluhatun mitoitus tehdään murtorajatilan mukaan • Paaluhatun leikkausraudoituksen laskennassa teräkset mitoitetaan kantamaan koko leikkausvoima • Paaluhatun momenttiraudoituksen määrittäminen tehdään myötöviivateoriaan perustuvaa mallia käyttäen • Paaluhatun ominaishalkeaman leveys määritetään betoninormeissa (BY 10) esitetyllä tavalla.

Nylundin esittämä kiskoliikenteen kuormien laskentamalli perustui kuvassa 11 esitettyyn jakautumismalliin. Kuvan 11 mukaisesti jakautuvat veturien akselikuormat tasaisesti raidepölkyn alueelle ja raiteen sepelipinnasta alaspäin mentäessä kasvaa kuorman jakautumisalue jakautumiskulman \varnothing_d mukaisesti. Jakautumiskulma \varnothing_d on tässä tutkimuksessa sama kuin pengermateriaalin kitkakulma. Veturikuormien sysäyslisä ε oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi olevan 20%, kun pengerkorkeus $h \leq 2m$ ja 0%, kun pengerkorkeus $h > 2m$.



Kuva 11: Kiskoliikenteen kuormien laskentamalli Nylundin mukaan. (Nylund 1978)

Paaluhattujen varaan perustetun ratapenkereen tuli Nylundin mukaan täyttää kolme kriteeriä. Kuormakriteeriä käytettiin sallitun paalukuorman laskemiseen, välimaakriteeriä paaluhattuvälin laskemiseen ja stabiliteettikriteeriä penkereen vakavuustarkasteluun. Kuormakriteerin toteuttava sallittu paalukuorma ratapenkereessä saadaan Nylundin mukaan laskettua seuraavilla kaavoilla:

$$P_{sall} = B^2 \gamma_{mk} (h + H) + A^2 H (\gamma_{bk} - \gamma_{mk}) + P_1 \quad (14)$$

$$P_1 = \frac{n \cdot F}{A_j} \times \frac{100 + \epsilon}{100}, \text{ kun pengerkorkeus } h \leq 2 \text{ m. } n = 1 \dots 4 \text{ ja } \epsilon = 20\%. \quad (15)$$

$$P_1 = \frac{n \cdot F_2}{A_j}, \text{ kun pengerkorkeus } h > 2 \text{ m. } n = 1 \dots 14. \quad (16)$$

P_{sall} on sallittu paalukuorma

B on paaluhatun peittoalueen sivumitta

γ_{mk} on maan tiheys

γ_{bk} on betonin tiheys

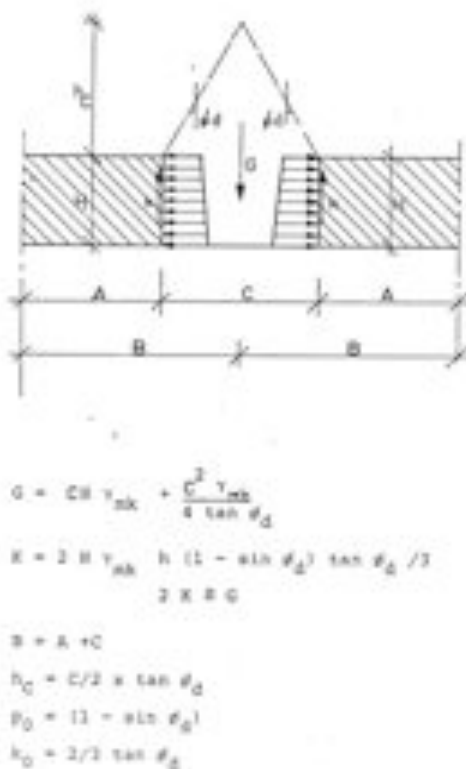
h on pengerkorkeus

H on paaluhatun korkeus

A on paaluhatun sivumitta

A_j on jakautumisalue

Välimaakriteeriä muodostaessaan Nylund otaksui välimaan muodostuvan paaluhattujen välissä ja paaluhattujen yläreunojen kautta kaltevuuteen \varnothing_d asetettujen tasojen alapuolella olevasta maasta (kuva 12).



Kuva 12: Ratapenkereen välimaakriteerin muodostaminen. (Nylund 1978)

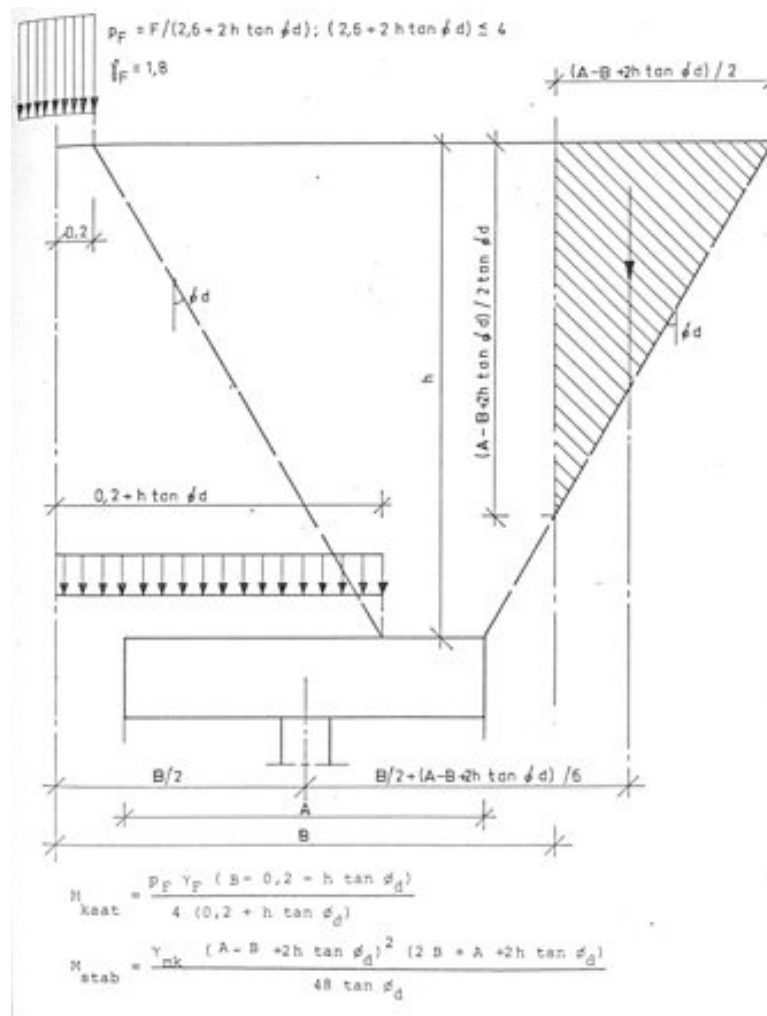
Kuvan 12 mukaisesti on maaosan tasapainoehtoista muodostettu tasapainoyhtälö:

$$4H\gamma_{mk}h(1 - \sin \varnothing_d) \tan \varnothing_d / 3 \geq CH\gamma_{mk} + \frac{C^2 \gamma_{mk}}{4 \tan \varnothing_d} \quad (17)$$

C on paaluhattujen vapaa väli

\varnothing_d on jakautumiskulma

Stabiliateetikriteerin laskennassa on epäedullisimmaksi kuormitustapaukseksi Nylundin tutkimuksessa valittu se veturiakselien rivi, joka sijaitsee paaluvälin keskellä. Oletuksena on, että veturiakselit jakautuvat raidepölkkyjen alueelle ja sijaitsevat rivissä 4 m välein (kuva 13).



Kuva 13: Ratapenkereen stabiliateetikriteerin muodostaminen. (Nylund 1978)

Kuvan 13 tasapainoehdoista on johdettu epäyhtälö, jonka mukaan stabiloivan kitkavoiman tulee olla suurempi kuin kaatavan omapainon:

$$M_{kaat} < M_{stab} \quad (18)$$

$$M_{kaat} = \frac{P_F \gamma_F (B - 0,2 - h \cdot \tan \varnothing_d)}{4(0,2 + h \cdot \tan \varnothing_d)} \quad (19)$$

$$M_{stab} = \frac{\gamma_{mk}(A - B + 2h \cdot \tan \varnothing_d)^2 (2B + A + 2h \cdot \tan \varnothing_d)}{48 \tan \varnothing_d} \quad (20)$$

P_F on akselikuormasta johtuva paalukuorma

γ_F on liikennekuorman osavarmuuskerroin

Nylundin toteuttama paaluhattujen käyttöalueiden tarkastelu erilaisissa pengertyypeissä muistuttaa paljolti Jääskeläisen & Rathmayerin (1975) tutkimuksessa tehtyä paaluhattujen peittävyystarkastelua. Nylundin työssä pengertyypit ovat hie-
tapenger, sorapenger ja louhoskivipenger, ja niiden peittävyysprosentit on määrit-
ty rakennekriteerien mukaan pengerkorkeuden funktiona. Jääskeläisen &
Rathmayerin tutkimuksessa tarkastellut pengertyypit olivat murskesora- ja sora-
penger ja esitetyt ohjearvot saatiin kriittisen pengerkorkeuden raja-arvona muut-
tamalla hattujen rakoleveydet kyseessä olevia mittausarvoja vastaaviksi
peittävyyksiksi.

Aiempiin mitoitusmenetelmiin verrattuna suurimmat erot Nylundin lisensiaatin
tutkimuksessa ovat kuormien laskennassa ja paaluhattujen mitoituksessa. Nylun-
din mukaan on paaluhatuille tulevien kuormien laskenta kuormanjakautumismal-
lien avulla vaivatonta. Mallien käyttö on hänen mukaansa perusteltua myös siksi,
että malleilla voidaan laskea liikennekuormasta johtuvat pystysuorat jännitykset
maassa myös kuormakaavioiden muuttuessa ja myös muiden rakenteiden kuin
paaluhattujen mitoituksessa. Nylundin kokemusten perusteella ovat jakautumis-
mallit myös käyttökelpoisempia suunnittelutyössä kuin esimerkiksi kimmoisaan
puoliavaruuteen perustuvat jännityskaavat.

Paaluhattujen mitoitusmenetelmä puolestaan poikkeaa aiemmin käytetyistä mitoi-
tusmenetelmistä monella tapaa. Nylundin tutkimuksessa paaluhattuihin paalua
varten tehtävä lovi on jätetty pois, ja paaluhatun raudoitusta on muutettu siten,
että koko leikkausvoima tulee terästen kannettavaksi. Näillä toimenpiteillä on paa-
luhatun korkeus saatu pienemmäksi ja hattu kevyemmäksi. Aiemmin paaluhatut
raudoitettiin ainoastaan momenttiraudoituksella ja leikkausrasitukset jätettiin be-
tonin kannettavaksi, jolloin paaluhatun korkeus oli väistämättä suurempi. Tällä
mitoitusmenetelmällä saatu teräsmäärä kyllä pieneni, mutta halkeilun estämiseksi
ei teräsmäärää voitu pienentää samassa suhteessa kuin paaluhatun korkeus kasvoi.
Nylundin mukaan tulevat vanhan käytännön mukaisesti mitoitettut paaluhatut tästä
johtuen 20...30% kalliimmiksi kuin hänen esittämällään tavalla mitoitettut hatut.

1980-luvulta 2000-luvulle:

1980-luvun alussa siirryttiin paaluhatturakenteiden suunnittelussa käyttämään paaluhattujen rakovälin mitoitusjärjestelmää, ja tämä mitoitusjärjestelmä on käytössä vielä nykypäivänäkin. Rakoväli tarkoittaa vierekkäisten paaluhattujen reunojen suurinta väliä, ja se mitoitetaan pengerkorkeuteen perustuen. 1990-luvun alusta lähtien perustettiin ratapenkereet paalulaattojen varaan ja paaluhattujen käyttö hiipui. (Mara 2000, Mikkonen 2005).

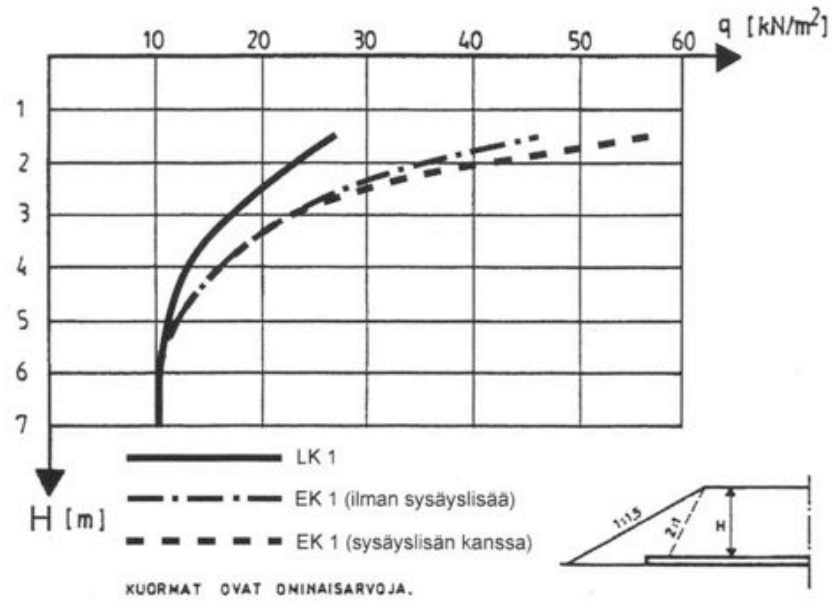
Paaluhattujen nykyinen, rakoväliin perustuva mitoituskäytäntö on käsitelty kattavasti Tiehallinnon julkaisussa ”Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohe” (Tiehallinto 2001). Seuraavassa on esitetty lyhyesti mitoitusmenetelmän perusteet ja mitoituksessa huomioitavat kuormitukset.

Kuormitukset	<ul style="list-style-type: none"> • Penkereen ja rakenteiden oman painon oletetaan siirtyvän kokonaan paaluille • Pengerkuorma p lasketaan penkereen muotoisena jakautuneena pystykuormana (kuva 5) • Liikennekuormat (Lk1 ja Ek1) otetaan huomioon paaluhatturakenteen yläpinnassa vaikuttavana tasaisena pystykuormana kuvan 14 mukaisesti. Liikennekuorma vaikuttaa kuvassa esitetyllä tavalla penkereen yläreunasta ulospäin kaltevuudessa 2:1 vedettyjen suorien sisään jäävällä alueella • Mitoituksessa huomioidaan myös vaakasuorat ulkoiset kuormat kuten maanpaine, sillan tulopenkereeseen pituussuunnassa vaikuttava pengerkuorma ja vaakasuorat liikennekuormat (jarrukuormat). Penkereeseen kohdistuvien ulkoisten vaakakuormien resultantin oletetaan siirtyvän paaluhatturakenteen paaluille kitka- ja muiden voimavaikutusten välityksellä • Paalutusalueelle tulevien maarakenteiden ja muiden rakenteiden suunnittelussa on pyrittävä eliminoimaan pohjamaan siirtymisestä suoraan paaluihin kohdistuvat kuormat, jotka voivat olla puristusrasituksia (kuten negatiivinen vaippahankaus) tai taivutus- ja leikkausrasituksia.
--------------	--

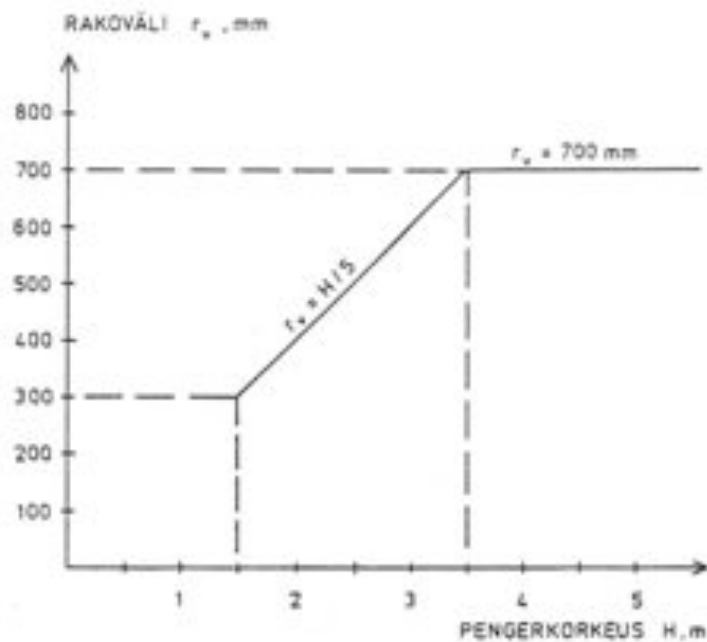
	<ul style="list-style-type: none"> • Suunnittelussa on huomioitava paalutustyöstä paaluille aiheutuvat kuormat ja pyrittävä välttämään niistä paaluille aiheutuvien siirtymien syntyminen
Paaluhatturakenne	<ul style="list-style-type: none"> • Maapohjan vakavuus alueellista sortumaa vastaan paalutusalueella on oltava vähintään 1,8. • Paalujen lyönnistä aiheutuva maan syrjäytyminen ja siitä aiheutuva huokosylipaine paalun ympäristössä on otettava huomioon laskelmissa • Paaluhatturakenne on mitoitettava edellä esitellyille kuormille huomioonottaen kaikki siihen kohdistuvat kuormat ja kuormavaikutukset
Penkereen suunnittelu	<ul style="list-style-type: none"> • Pengerkorkeuden on oltava vähintään kolminkertainen hattujen rakoväliin nähden (tierakentamisessa kuitenkin vähintään 1,5 m ja moottoritiellä 1,8 m) • Penkereen osat ovat kuormaa jakava kerros, pengertäyte ja päällysrakennekerrokset. Kuormaa jakavan kerroksen vähimmäisvahvuus on rakoväli kerrottuna kahdella, kuitenkin vähintään 1 m. • Paaluhattujen päälle ja väliin on sijoitettava 300 mm suojakerros, joka tehdään sorasta tai murskeesta (maksimira-ekoko 50 ... 150 mm) • Pengerkorkeuden ollessa alle 3,5 m on suojakerroksen päälle asetettava lujite, joka estää kuormaa jakavan kerroksen yläosan ja pengertäytteen valumisen maapohjan painuessa. • Penger materiaalina on käytettävä karkearakeisia materiaaleja, kuten louhetta, mursketta, soraa, hiekkaa, sora- tai hiekkamoreenia • Paaluhatturakenteen korkeustason tulee mukailla olemassa olevaa tai leikattavaa maanpintaa, ja rakenteen suunnittelussa tulee huomioida paalutuksesta johtuva maanpinnan nousu sekä sen jälkeinen painuma • Routamitoitus kerran 20 vuodessa toistuvan pakkasmäärän mukaan pohjarakennusohjeen (RIL 121) mukaisesti

Paaluhattun rakovälin mitoitus	<ul style="list-style-type: none"> • Paaluhatturakenteen rakoväli mitoitetaan pengerkorkeuteen perustuen kuvan 15 avulla. Rakovälillä tarkoitetaan vierekkäisten hattujen reunojen suurinta väliä. • Rakoväliä on tarvittaessa pienennettävä hattukokoa suurentamalla niin, että hattujen peitto-osuus on vähintään 0,4. Paaluhattujen peitto-osuudella tarkoitetaan hattujen yhteenlasketun pinta-alan suhdetta koko paalutettavan alueen pinta-alaan
Paaluväli ja paaluhattun koon valinta	<ul style="list-style-type: none"> • Paaluväli (paalujen k/k -väli) mitoitetaan laskennallisten kuormien ja paalun kantokyvyn mukaan yhtälöistä (21) ja (22) • Paaluvälin mitoituksessa on tarpeen mukaan otettava huomioon paalujen rakenteellista kantavuutta alentavat paaluihin kohdistuvat taivutus- ja leikkausjännitykset sekä maaperäolosuhteet (nurjahdus) • Paaluvälin mitoituksessa otetaan huomioon penger- ja liikennekuorman lisäksi huomioon suoraan paaluun kohdistuvista kuormista paaluille siirtyvät kuormat, kuten negatiivinen vaippahankaus • Negatiivisen vaippahankauksen suuruus määritetään kaavalla (23) • Rakovälin ja paaluvälin mitoituksen jälkeen valitaan hattukoko ottaen huomioon hattujen peitto-osuudelle asetettu vaatimus (vähintään 0,4) • Suurin käytettävä hattukoko on 2,0 x 2,0 m²

Paaluhattujen varaan perustetun penkereen liikennekuormitukset määritetään Tiehallinnon (2001) mukaan kuvan 14 perusteella. Paaluhattujen rakoväli puolestaan mitoitetaan saman ohjeen mukaisesti kuvasta 15.



Kuva 14: Liikennekuorman syvyydessä H aiheuttama tasainen kuorma. (Tiehallinto 2001)



Kuva 15: Paaluhatturakenteessa käytettävä maksimirakováli, betonipaalut (Tiehallinto 2001)

Paaluväli b mitoitetaan Tiehallinnon (2001) mukaan laskennallisten kuormien ja paalun kantokyvyn mukaan yhtälöistä (21) ja (22).

$$P = \sigma_{sall} d^2 \quad (21)$$

$$P = b^2(\gamma h + q) + P_{neg} \quad (22)$$

P on paalukuorma, kN

σ_{sall} on paalulle sallittu geotekninen kantavuus, kPa

d on paalukoko (sivumitta), m

b on paaluväli, m

γ on penkereen keskimääräinen tilavuuspaino, kN/m³

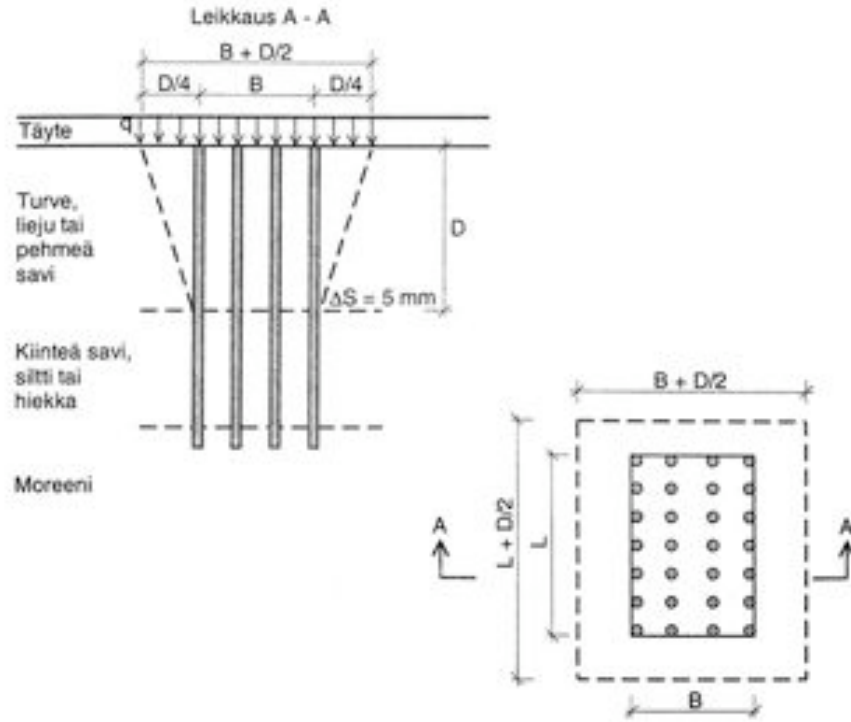
h on pengerkorkeus hatun alapinnasta, m

q on liikennekuorma, kPa

P_{neg} on negatiivinen vaippahankauskuorma paalua kohti, kN

Negatiivinen vaippahankaus johtuu siitä, että paalua ympäröivä maa painuu paalua nopeammin, ja se on otettava huomioon paalun kantavuuden mitoituksessa. Negatiivinen vaippahankaus määritetään lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) esitettyjen ohjeiden mukaisesti seuraavasti:

Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttamaa paalun tai paaluryhmän lisäkuormaa laskettaessa voidaan negatiivisen vaippahankauksen otaksua mobilisoituvan sellaiseen syvyyteen saakka, missä paaluja ympäröivän maakerroksen painuma on 5 mm suurempi kuin paalun painuma. Yksittäisiä paaluja kuormittaa todennäköisesti suurin mahdollinen lisäkuorma, kun taas paaluryhmissä paaluun kohdistuvan lisäkuorman suuruus riippuu paalujen keskiöetäisyydestä ja paalujen lukumäärästä. Tiheiden ja suurien paaluryhmien kokonaislisäkuorma, P_{neg} , voidaan laskea kaavojen (23) ja (24) sekä kuvan 16 perusteella. Paaluryhmän mitoituksessa voidaan käyttää pienempää näin saaduista arvoista. Yksittäisen paalun lisäkuorma saadaan jakamalla kokonaiskuorma paalujen lukumäärällä n .



Kuva 16: Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttaman kokonaislisäkuorman laskeminen paaluryhmälle. (LPO 2005)

$$P_{neg} = B \times L \times q + 2 \times (B + L) \times D \times s_u \quad (23)$$

$$\text{tai } P_{neg} = \left(B + \frac{D}{2}\right) \times \left(L + \frac{D}{2}\right) \times q \quad (24)$$

Paalulle negatiivisesta vaippahankauksesta tulevan lisäkuorman vaikutus paalun sallittuun geotekniseen kantavuuteen voidaan tarkastaa esimerkiksi kaavojen (25) ja (26) mukaisesti.

$$P_{pitkäaik} + P_{neg} \leq P_{sall} , \text{ kun } P_{lyhytaik} \leq P_{neg} \quad (25)$$

$$P_{pitkäaik} + P_{lyhytaik} \leq P_{sall} , \text{ kun } P_{lyhytaik} > P_{neg} \quad (26)$$

P_{neg} on paalun negatiivinen vaippahankaus

P_{sall} on paalun sallittu geotekninen kantavuus

$P_{pitkäaik}$ on vaikutusajaltaan pitkäaikaiset paalukuormat

$P_{lyhytaik}$ on vaikutusajaltaan lyhytaikaiset paalukuormat

Tiehallinnon (2001) suunnitteluohjeessa mainitaan lisäksi, että pengerpaalutuksessa pitkäaikaisten kuormien vaikutus on yleensä määräävä, joten negatiivinen vaippahankaus vähennetään käyttötilan sallitusta arvosta. Lyhytaikaisten kuormien ei katsota vaikuttavan samanaikaisesti negatiivisen vaippahankauksen kanssa.

Rakoväliin perustuvan mitoitusmenetelmän käytön myötä pienenivät uusien paaluhattupenkereiden paaluhattuvälit merkittävästi. Vanhoissa mitoitusohjeissa käytetty rakováli H/3 vaihdettiin rakováliin H/5, ja maksimirakoväliksi asetettiin 0,7 m myös yli 3,5 m korkuisilla penkereillä. Lisäksi rakováliin perustuvassa mitoitusmenetelmässä nostettiin paaluhattujen peittävyiden minimivaatimusta arvoon 0,4. Jääskeläisen & Rathmayerin paaluhattututkimuksessa tuli paaluhattujen peittävyiden olla vähintään 0,3 yli 3,5 m korkuisissa murskesorapenkereissä. Myös kuormitusten laskenta tarkentui ja monipuolistui suunnittelun kehittyessä 1970-luvulta 2000-luvulle.

1970-luvulta lähtien on ratapenkereiden paaluhattuperustusten suunnittelussa noudatettu voimassaolevien mitoitusmenetelmien lisäksi erityisesti rautatierakentamista koskevaa ohjeistusta. 1980-luvulla suurin muutos suunnittelussa oli rakováliin perustuvan mitoitusmenetelmän käyttöönotto, ja 1990-luvun lopulla ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisu ”Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset, RMYTL, osa 3, perustamis- ja vahvistamistyöt” (RHK 1999). Sen mukaan paaluhattujen käyttöalueena ovat ensisijaisesti ainoastaan hitaasti liikennöivät teollisuusraiteet tai ratapihat. Julkaisu on uudistettu versio vuonna 1976 ilmestyneestä VR:n julkaisusta ”Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys, RMYT, osa 912, vahvistamistyöt”, mutta siitä on jätetty paaluhattujen mitoitus pois kokonaan. 2000-luvulla julkaisi Ratahallintokeskus myös rautateiden perustusten suunnittelua käsittelevän ”Ratatekniset määräykset ja ohjeet, RAMO, osa 3, radan rakenne” (RHK 2002). RMYTL:n tapaan myös RAMOsta oli jätetty paaluhatturakenteiden suunnittelu pois. Julkaisu käsittelee kuitenkin kattavasti radan suunnittelussa huomioitavien ulkoisten kuormien mitoituksen sekä radan alus- ja pohjarakenteiden suunnittelukriteerit, ja se on päivitetty vuonna 2005 vastaamaan Eurocodessa esitettyjä määräyksiä ja ohjeita.

2.4 Paaluhatturakenteen ongelmat liikenteen alaisella raiteella

Nykyään uusia junaratoja ei perusteta paaluhatturakenteiden varaan muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Suurin osa 1970-luvulla paaluhattujen varaan perustetuista ratapenkereistä suunniteltiin VTT:n vuonna 1975 julkaisemaan paaluhattujen suunnitteluohjeeseen perustuen. (Kujala 2005, Mara 2000) Ohjeen

mukaista mitoitusmenetelmää käytettäessä jäi suurilla paaluväleillä hattujen rakoväli suureksi hattujen peittoprosentin ollessa hyvä, mikä häiritsi rakenteen holvautumista. (Jääskeläinen & Rathmayer 1975, Kujala 2005)

Liikenteen alaiselle raiteelle tyypilliset olosuhteet kuten junista aiheutuva dynaaminen kuormitus, runsaat sateet sekä veden jäätyminen ja sulaminen pakkaskauden aikana edistävät holvautumisen purkautumista. Olosuhteista ja hattujen liian suurista rakoväleistä johtuen eivät valmiit paaluhatturakenteet ole toimineet toivotulla tavalla, vaikka paaluhattujen koot ja niiden välit on suunniteltu ja toteutettu silloisen ohjeen mukaisesti. (Kujala 2005, RHK 2006, Tiehallinto 2003)

Holvautumisen epäonnistuessa ratapenkereen alla jatkaa paaluhattujen välissä oleva maa painumistaan kuvan 3b mukaisesti (Jääskeläinen & Rathmayer 1975). Maan painuessa syntyy paaluhattujen alle tyhjätiloja, joihin paaluhattujen välissä oleva rakennekerrosmateriaali valuu, ja tämän seurauksena paaluhattut eivät ole enää tuettuja joka suunnalta. Tuennan häiriintyessä pääsevät paaluhattut kallistumaan ja lopulta kaatumaan, jos syntynyttä tyhjätilaa ei korjata ja valumista ehkäistä. (RHK 2006, Tiehallinto 2003) Paaluhattujen kallistuessa ja pengermateriaalin valuessa tyhjätiloihin muodostuu ratapenkereeseen painaumia, jotka lisäävät radan kunnossapidon tarvetta ja aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia. (RHK 2006)

2.5 Paaluhatturakenteiden painumaongelmien nykyiset korjausmenetelmät

2.5.1 Keveät ja raskaat korjausmenetelmät

Paaluhatturakenteiden painumaongelmia on korjattu sekä kevein että raskain menetelmin. Ratahallintokeskuksen raportin (2006) mukaan nykyiset käytössä olevat keveät korjausmenetelmät ovat paaluhattujen alapuolisen tyhjätilan täyttö sekä teräsponsittien lyöminen vaakatasoon paaluhattujen yläpuolelle. Keveät menetelmät eivät vaadi raiteen purkamista korjaustoimenpiteiden ajaksi. Raskaampi käytössä oleva korjausmenetelmä on stabilointielementtien asennus paaluhattujen yläpuolelle. Elementtien asennus edellyttää raiteen purkamista ja raideliikenteen katkaisemista korjaustöiden ajaksi. Edellä mainittujen korjaustoimenpiteiden lisäksi mainitaan Terhi Mikkosen diplomityössä (2005) lujitekankaiden tai -verkkojen asennus paaluhattujen yläpuolelle sekä teräsbetoni-laatan käyttö paaluhattujen yläpinnassa.

2.5.2 Paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttö

Keveimmällä menetelmällä, eli tyhjätilojen täyttämällä, pyritään vain estämään suurempien painumavaurioiden syntyminen ratarakenteeseen. Korjausratkaisu ei

ole pysyvä, eikä varsinainen painumisongelma poistu. Yleensä tyhjätilat on täytetty kevytsoralla, mutta myös vaahtobetoni, murske ja maakostea betoni ovat sopivia materiaaleja.

Puhallusputkimenetelmässä työnnetään putki radan kummaltakin puolelta reunimmaisten paaluhattujen alta kohti radan keskiosaa, ja putken avulla puhalletaan täyttöaines tyhjätiloihin. Keskimmäisten paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttyminen on epävarmaa, jos paaluhatturivejä on enemmän kuin kolme. Kuvassa 17 on nähtävissä paaluhattujen alapuolinen tyhjätila, jossa painuminen on jatkunut kevytsorapuhalluksesta huolimatta. (Mikkonen 2005, RHK 2006)



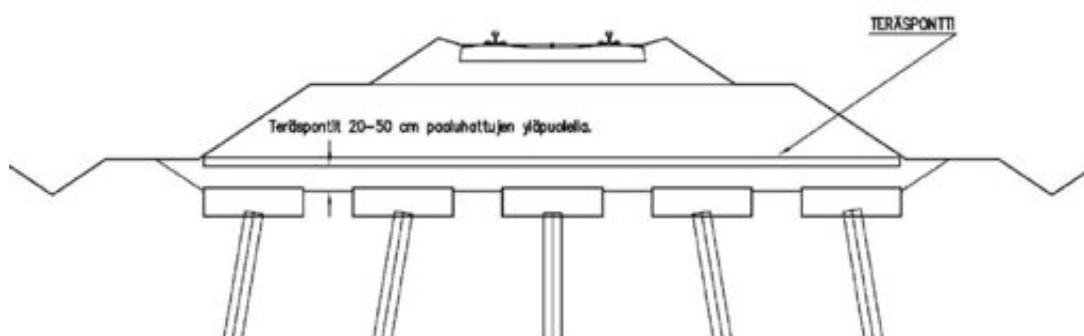
Kuva 17: Kevytsorapuhalluksella korjatun paaluhatturakenteen alapuolelle muodostunut tyhjätila rataosuudella Vuohimäki-Kela.

2.5.3 Teräsponttien lyöminen vaakaan paaluhattujen yläpuolelle

Vaakaponttien lyömisellä paaluhatturakenteen yläpuolelle pyritään estämään penkermateriaalin valuminen hattujen alapuolisiin tyhjätiloihin. Pontit lyödään vaakasuoraan 0,2 - 0,5 m paaluhattujen yläpuolelle, sillä paaluhattujen korkeusasemat voivat vaihdella kallistumisesta ja alkuperäisestä asennuksesta johtuen. Teräsponttien alapintaan voidaan asentaa rei'itetty teräsputki paaluhattujen alapuolista tyhjätilojen täyttöä ja hatturakojen tukkimista varten. Vaakapontteja käytettäessä mahdollinen tyhjätilojen täyttö tehdään polyuretaanilla.

Pontit voidaan lyödä penkereeseen lyhyilläkin raidevarauksilla. Menetelmä ei kuitenkaan sovellu käytettäväksi leveissä penkereissä, ja ponttien täytyy asennusvai-

heessa saattaa hankaloittaa paaluhatturakenteen varaan perustetun penkereen holvautumista. Paaluhattujen korkeusaseman vaihteluista johtuen voi hatun ja pontin väliin jäädä reilustikin maata, ja tämän maan käyttäytymistä painumistilanteessa ei tunneta. Jos paaluhattujen korkeusasema halutaan selvittää tarkemmin, on ratapenger kaivettava auki ja kallistuneet hatut oikaistava sekä tyhjätilat täytettävä ennen ponttien asennusta. Kuvassa 18 on esitetty periaatekuva valmiista teräspontein korjatusta ratapenkereestä. (Mikkonen 2005, RHK 2006)



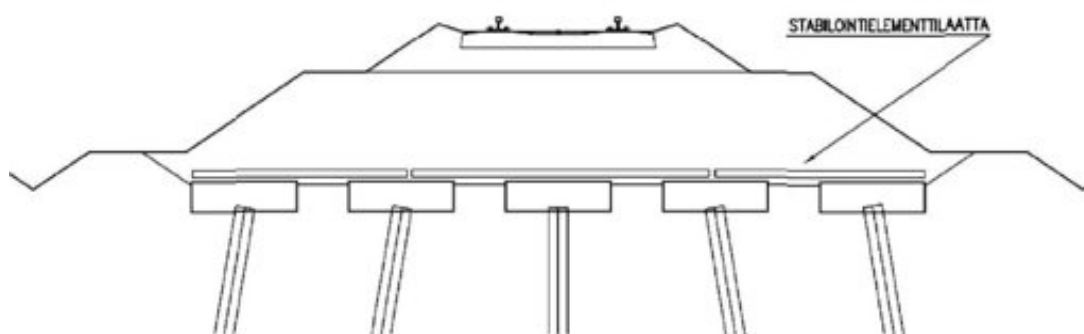
Kuva 18: Paaluhattujen yläpuolelle vaakaan lyöty teräspontti. (RHK 2006)

2.5.4 Stabilointielementtien asentaminen paaluhattujen yläpuolelle

Stabilointielementtejä käytettäessä on ratapenger kaivettava auki asennusta varten. Elementit estävät pengermateriaalin valumisen paaluhattujen alapuolisiin tyhjätiloihin, mutta niiden asentaminen edellyttää pitkää raidevarausta. Stabilointielementeille ei tehdä rakenteellista mitoitus.

Radan päällysrakenne on purettava ja eristyskerros on kaivettava pois siten, että paaluhattut saadaan näkyviin ja kallistuneet hatut voidaan oikaista. Tämän jälkeen hattujen välit täytetään ja tiivistetään hiekalla ja hattujen väliset kaltevuus- ja korkeuserot tasataan maakostealla betonilla. Näin stabilointielementille saadaan tasainen asennusalusta.

Kukin elementti tukeutuu neljään paaluun ja asennus toteutetaan siten, että raidetta vastaan kohtisuora sauma osuu paalurivin kohdalle. Lopuksi elementtien päälle asennetaan suodatinkangas, jotta eristyssoran valuminen saumavälistä estyy. Stabilointilaattaelementit eivät ole toisissaan kiinni. Kuvassa 19 on havainnollistettu stabilointilaattaelementin käyttöä ratapenkereessä. (Mikkonen 2005, RHK 2006)



Kuva 19: Paaluhattujen yläpintaan asennetut stabilointilaattaelementit. (RHK 2006)

2.5.5 Lujiteverkkojen ja –kankaiden käyttö sekä teräsbetonilaatan asennus paaluhattujen yläpintaan

Paaluhattujen yläpuolelle voidaan asentaa lujitekangas tai –verkko estämään penger materiaalin valuminen paaluhattujen alapuolisiin tyhjätiloihin. Menetelmä ei ole kestävä ratkaisu painumaongelman korjaamiseen, mutta edellyttää silti radan aukaisemista ja junaliikenteen katkaisua. Lujiteverkkojen tai –kankaiden asennus on liian kevyt korjausmenetelmä pääradoille. Menetelmässä ratapenger kaivetaan auki ja paaluhatut suoristetaan ennen lujitekankaan tai –verkon asennusta. Vasta täyttötöiden jälkeen voidaan raide avata junaliikenteelle, joten menetelmä soveltuu vain vähäliikenteisille junaradoille. Vaikka itse lujitemateriaalit ovat suhteellisen edullisia ja niiden asennus on helppoa, ovat liikennehaittakustannukset suuret.

Teräsbetonilaatan asennus paaluhattujen yläpintaan on raskas korjausmenetelmä, jolla paaluhattujen painumaongelmat saadaan ratkaistua suhteellisen kestävästi. Menetelmä vaatii kuitenkin pitkän raidevarauksen ja on kallis, sillä sen toteuttamiskustannukset sekä liikennehaittakustannukset ovat merkittävät. Paaluhattujen yläpintaan tuleva laatta voidaan mitoittaa rakenteellisesti.

Teräsbetonilaatta käytettäessä rata kaivetaan auki siten, että paaluhatut saadaan näkyviin. Paaluhatut otetaan pois paikoiltaan, ja niiden alapuoliset tyhjätilat täytetään ja tiivistetään. Hattujen korkeuserot tasataan katkaisemalla tarvittaessa paalujen päät sopivalle korkeudelle. Tämän jälkeen paaluhatut asennetaan takaisin paikoilleen, ja niiden yläpäästä pestään puhtaaksi tartunnan parantamiseksi. Näiden työvaiheiden jälkeen voidaan hattujen päälle valaa yhtenäinen, raudoitettu teräsbetonilaatta, joka kallistetaan poikkisuunnassa laskemaan keskeltä reunoja kohti. Täyttötöyt päästään aloittamaan heti, kun laatta on saavuttanut riittävän lujuuden. (Mikkonen 2005) Ratahallintokeskuksen (2006) mukaan teräsbetonilaatan käytöstä painumaongelmien korjaamisessa ei ole vielä kokemuksia.

3 Suihkuinjektointi

3.1 Suihkuinjektointimenetelmä

Suihkuinjektointimenetelmä kehitettiin vuonna 1973 Japanissa, josta se levisi Eurooppaan 70-luvun lopulla ja 80-luvun alussa (Gazzarini et al. 2005). Suomen Standardoimisliitto (2008) määrittelee suihkuinjektoinnin prosessina, jossa maa-aines hajotetaan osiin ja sekoitetaan sideaineen kanssa siten, että osa maa-aineksesta korvataan sideaineella. Itse hajottaminen perustuu hydraulisen energian käyttöön (Brill et al. 2003) ja se toteutetaan korkeapainesuihkulla, joka voi koostua sideaineesta tai vedestä. Hajottavaa korkeapainesuihkua voidaan avustaa paineilmasuihkulla. Sideaineen kovettuessa maa-aineksen kanssa muodostuu suihkutettuun kohtaan suihkutustavasta riippuen joko maabetoninen pilari tai paneeli (Bell 1993, Gazzarini et al. 2005, Ichise et al. 1974, Kolymbas 1997).

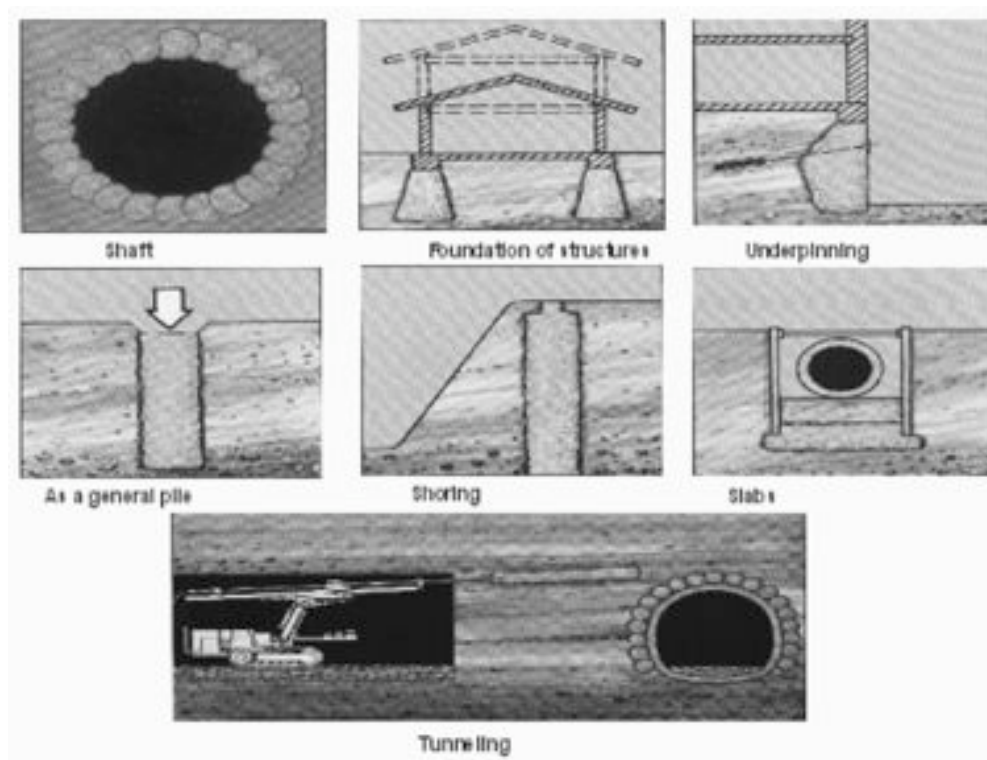
Jääskeläinen (2003) puolestaan kuvaa suihkuinjektointimenetelmän perusajatusta seuraavasti: suihkuinjektoinnissa käytetyn suihkuinjektointijohteen kärkiosa sijoitettujen suuttimien kautta voidaan pieniläpimittaisella, korkeapaineisella suihkulla leikata ja osittain syrjäyttää maakerros, johon suihku on suunnattu ja johon käytetty sideainesuspensio sekoittuu. Pyörittämällä ja hitaasti nostamalla suihkuinjektointijohdetta saadaan maahan syntymään maabetoninen pilari.

Suihkuinjektointimenetelmällä voidaan toteuttaa pysty- ja vaakasuuntaisia elementtejä, jotka ovat tavallisimmin pilareita tai paneeleja. Valmistettaessa toisiinsa liittyviä suihkuinjektoituja elementtejä saadaan aikaan suihkuinjektointirakenteita. Esimerkiksi kuvan 20 mukaisen suihkuinjektoidun kaivantoseinän tekeminen onnistuu suihkuttamalla useita pilareita perätysten siten, että elementit limittyvät reunoistaan. (Brill et al. 2003, Pearlman 1998, SFS 2008, Zilch et al. 2001)



Kuva 20: Suihkuinjektoiduista, toisiinsa limittyvistä pilarielementeistä muodostuva kaivantoseinä. (SFS 2008)

Suihkuinjektoinnin käyttökohteita ovat esimerkiksi perustusten vahvistaminen, heikosti vettä läpäisevät sulkumuurit, myötäävät ja tukevat rakenteet, geoteknisten töiden täydentämiskohteet, maa-aineksen lujittaminen, tunneli- ja kaivantorakenteiden lujittaminen, erittäin raskaiden teollisuusrakennusten perustukset ja pohjaveden eristysseinämät. Menetelmän avulla voidaan myös ehkäistä maaperän sisäistä eroosiota tai estää myrkkujen leviäminen pohjaveteen. (Brill et al. 2003, Henn 1997, Ichise et al. 1974, Jääskeläinen 2003, Pearlman 1998, SFS 2008) Ku-
vassa 21 on esillä muutamia suihkuinjektoinnin käyttökohteita.



Kuva 21: Suihkuinjektoinnin käyttökohteita. Ylärivissä vasemmalta: kuilun tuenta, perustusten vahvistus rakennuksen kuormien kasvaessa, perustusten vahvistaminen. Keskellä vasemmalta: maapilari, kaivannon pystytuenta, laatat. Alarivissä: tunnelin seinien vahvistus ennen kaivua. (Gazzarini et al. 2005)

Suihkuinjektoidun elementin poikkileikkausmittoihin ja lujuuteen vaikuttavat valittu suihkuinjektointijärjestelmä, suihkutuspaine ja maa-aineksen tyyppi ja heterogeenisyys. Suihkun tunkeutuvuus maa-ainekseen on riippuvainen suihkutussuuttimen halkaisijasta sekä suihkutuspaineen ja maan kantokestävyyden välisestä paine-erosta. Tunkeutuvuuden raja saavutetaan, kun keskimääräinen dynaaminen paine suihkun kärjessä on yhtä suuri kuin maan murtokestävyys. (Henn 1997, Ho 2007) Suihkun tunkeutuvuuteen voidaan vaikuttaa avustamalla

suihkutusta korkeapaineisella vesisuihkulla. Valmiit suihkuinjektoidut pilarit ovat halkaisijaltaan tavallisesti 0,4 - 1,5 m, mutta uusimmalla menetelmällä eli SuperJet Groutingilla ollaan päästy halkaisijaltaan jopa 5 m kokosiin pilareihin. (Jääskeläinen 2003, Brill et al. 2003, Kolymbas 1997)

Gazzarini et al. (2005) listaavat seuraavia suihkuinjektointimenetelmän käyttöön liittyviä etuja. Suihkuinjektointityön toteutus ei aiheuta värinöitä ympäröivään maaperään, joten injektointipaikan lähellä olevat rakenteet ovat turvassa. Suihkuinjektointi voidaan toteuttaa ahtaissakin paikoissa suihkutusalustelaitteiston suhteellisen pienen koon vuoksi. Menetelmää käytettäessä on mahdollisuus porata ja suihkuttaa myös esteiden läpi käytettäessä esiporattuja reikiä. Suihkuinjektointi on pysyvä maanvahvistuskeino, mikäli suihkutuksessa käytetään sopivaa sideainetta. Suihkutettavien pilareiden muotoa ja suihkuinjektointiparametreja voidaan muuttaa vielä injektointityön aikana olosuhteiden yllättäessä, mikä tuo joustavuutta työskentelyyn. Edellä lueteltujen seikkojen lisäksi listaavat Brill et al. (2003) ja Pearlman (1998) suihkuinjektoinnin eduiksi menetelmän soveltuvuuden erityyppisten maiden vahvistukseen sekä sen, että kaikki työ voidaan tehdä in situ eli paikallaan. Menetelmän haittapuolena on suihkutuksesta aiheutuvan ylijäämälietteen muodostuminen (Gazzarini et al. 2005). Mahdollisia muita haittoja ovat maan kohoaminen tai soramaan murtuminen pystysuuntaisessa suihkuinjektoinnissa, jos sideainesuspension vesisementtisuhte on valittu väärin. Lisäksi pitkiä, vaakasuuntaisia suihkuinjektointirakenteita tehtäessä voi ongelmaksi muodostua riittävän poraustarkkuuden saavuttaminen (Bell 1993, Kolymbas 1997).

3.2 Suihkuinjektoinnissa käytettävä laitteisto ja suihkuinjektointityön toteutus

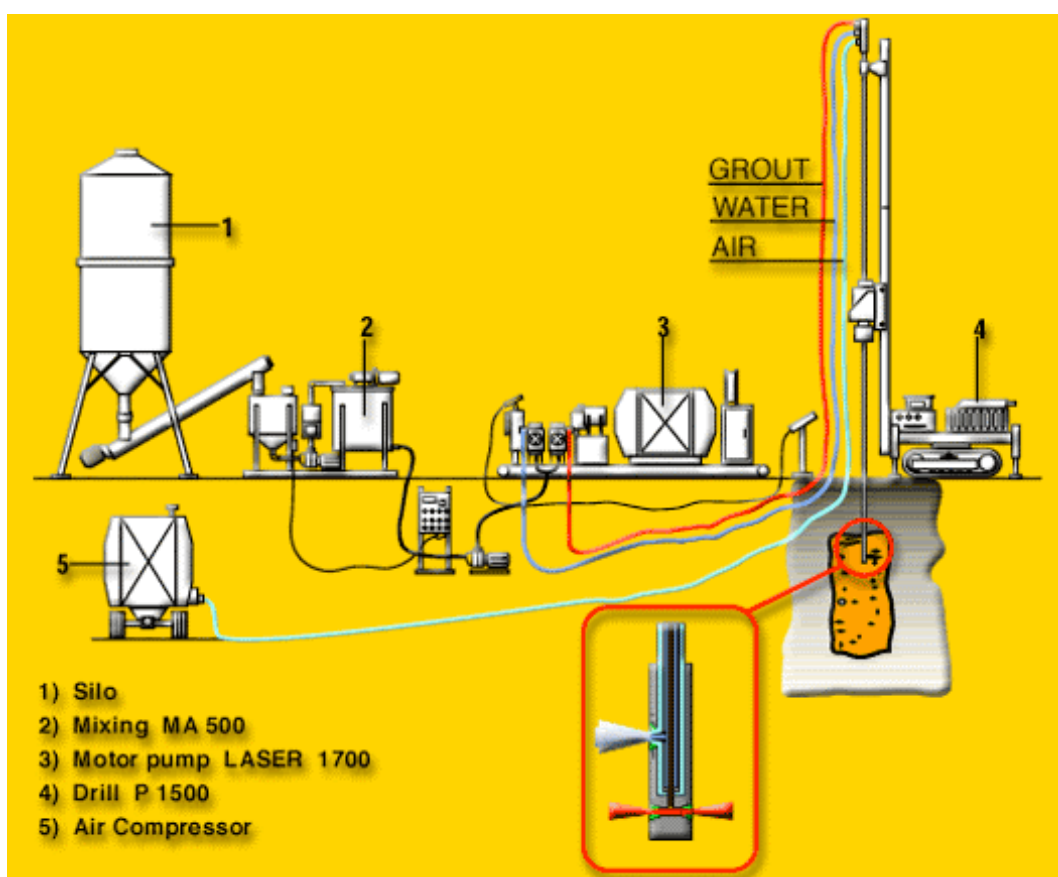
3.2.1 Suihkuinjektointilaitteisto

Suomen Standardoimisliiton (2008) mukaan suihkuinjektointilaitteisto koostuu yleensä seuraavista osista:

1. Porauslaitteisto.
2. Suihkuinjektointilaitteisto (usein samalla porauslaitteisto), johon on asennettu suihkuinjektointijohde, porakruunu ja laitteet, jotka pystyvät tunkemaan suihkuinjektointijohdetta ennalta määritellyllä pyörimis- ja siirtymänopeudella.
3. Sekoitus- ja pumppausasema, joka syöttää sideainesuspensiota.
4. Korkeapainejohtimet, jotka liittävät suihkuinjektointipumpun laitteistoon.

5. Laitteet, joiden avulla seurataan paineita, pyörimis- ja ulosvetonopeutta sekä syvyyttä, sekä sideainesuspension, veden ja ilman virtausnopeuksia ja tilavuuksia.

Avustettaessa suihkuinjektointia paineilmasuihkulla, kuuluu laitteistoon myös kompressor, jolla tuotetaan korkeapaineinen ilma. Esimerkki suihkuinjektointilaitteistosta on esitetty kuvassa 22. Suihkuinjektointilaitteiston on kyettävä varmistamaan keskeiset suihkuinjektointitoiminnot. Nämä toiminnot ovat suihkuinjektointijohteen siirtymä- ja pyörimisliikkeen suoritus suunnitellulla nopeudella, sekä nesteiden syöttö asemalta suihkuinjektointijohteeseen vaaditulla paineella ja virtausnopeudella. Suunniteltaessa suihkuinjektointijohteen pituutta ja johteeseen liittyvän maston korkeutta, on pyrittävä sellaisiin arvoihin, että suihkuinjektointityö saataisiin toteutettua mahdollisimman vähillä keskeytyksillä. (Gazzarini et al. 2005, SFS 2008)



Kuva 22: Esimerkki suihkuinjektointilaitteistosta: 1) sementtisiilo, 2) sekoitusasema, 3) pumppausasema, 4) poravaunu sekä 5) paineilmakompressor. (Pacciosi Drill Spa 2008)

3.2.2 Yksittäis-, kaksois- ja kolmoisjärjestelmä

Suihkuinjektoidut pilari- ja paneelielementit voidaan toteuttaa käyttäen yksittäisjärjestelmää, kaksoisjärjestelmää tai kolmoisjärjestelmää. Suihkuinjektointijärjestelmissä käytettävät erilaiset suihkuinjektointijohteet on esitetty kuvassa 23.

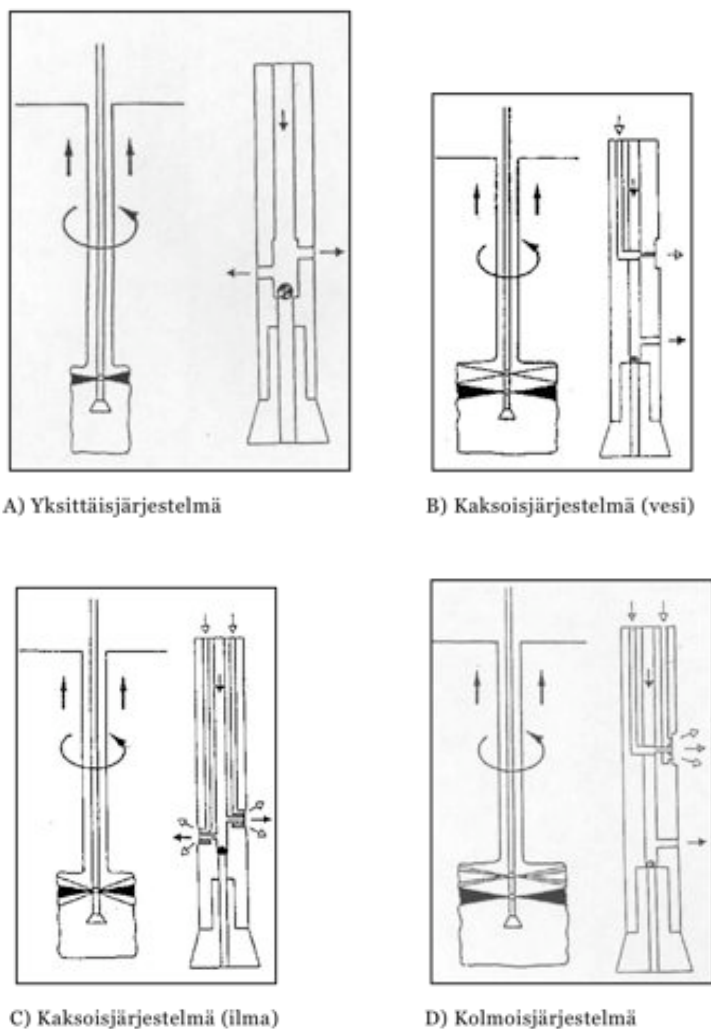
Yksittäisjärjestelmässä sekä maa-aineksen hajottaminen että sementointi tehdään korkeapaineisella sideainesuspensiosuihkulla. Yleensä sideaineena käytetään sementtiä. Yksittäisjärjestelmää käytettäessä suihkuinjektointijohde käsittää vain yhden kanavan, joka kuljettaa korkeapaineisen sideainesuspension porakruunun suuttimiin.

Kaksoisjärjestelmässä maa-aineksen hajottamista ja sementoimista helpotetaan paineilmasuihkulla. Vaihtoehtoisesti kaksoisjärjestelmässä voidaan maa-aineksen hajottaminen toteuttaa korkeapaineisella vesisuihkulla ja varsinainen sementointi samanaikaisesti erillisellä sideainesuspensiosuihkulla. Kaksoisjärjestelmässä on suihkuinjektointijohteessa kaksi kanavaa, jotka erikseen kuljettavat sideainesuspensiota ja vettä tai sideainesuspensiota ja ilmaa porakruunun suuttimiin.

Kolmoisjärjestelmässä maa-aineksen hajottaminen toteutetaan korkeapaineisella vesisuihkulla, jota avustetaan paineilmasuihkulla, ja sementointi toteutetaan samanaikaisesti korkeapaineisella sideainesuspensiosuihkulla. Kolmoisjärjestelmässä on käytettävän suihkuinjektointijohteen sisällä vastaavasti kolme kanavaa, jotka kuljettavat paineilman, korkeapaineveden ja sideainesuspension porakruunun suuttimiin. (Brill et al. 2003, Gazzarini et al. 2005, SFS 2008, Zilch et al. 2001)

Hayward Bakerin (2004) mukaan on yksittäisjärjestelmä tehokkain menetelmä suihkuinjektoitaessa kitkamaita. Kaksoisjärjestelmä soveltuu koheesiomaille yksittäisjärjestelmää paremmin, mutta tehokkain suihkuinjektointimenetelmä koheesiomaille on Hayward Bakerin mukaan kolmoisjärjestelmä. Tektrackerin (2008) mukaan perustuu suihkuinjektointimenetelmän valinta olosuhteiden vaativuuteen. Kolmoisjärjestelmän käyttö on edullisinta vaikeasti porattavassa maaperässä, sillä sitä käytettäessä joudutaan saman maavolyymien käsittelymiseksi poraamaan vähemmän reikiä. Menetelmä on kuitenkin yksittäisjärjestelmää haastavampi ja kalliimpi, ja se vaatii lisälaitteistoa. Lisäksi menetelmävalinnassa on huomioitava, että kolmoisjärjestelmässä porarei'istä purkautuu enemmän lietettä muihin menetelmiin verrattuna, mikä lisää kustannuksia ja saattaa aiheuttaa ongelmia huonosti läpäisevissä maissa. Yksittäisjärjestelmä on Tektrackerin mukaan monipuolisempi, sillä sitä käytettäessä voidaan suihkuinjektointi toteuttaa missä kaltevuuskulmassa tahansa, ja siitä johtuen se soveltuu laajalti olemassa olevien rakenteiden stabiloimiseen ja tunneleihin, missä tilaa on rajatusti. Laitteiston pysyttämisen- ja injektointiajat ovat merkittävästi lyhyemmät kuin kolmoisjärjestelmäs-

sä, ja menetelmä on halvempi, siistimpi ja hiljaisempi kuin kolmoisjärjestelmä. Kaksoisjärjestelmällä puolestaan saavutetaan suuremmat poikkileikkaukset kuin yksittäisjärjestelmässä, mutta se vaatii lisälaitteistoa ja on yksittäisjärjestelmää kalliimpi. (Tektracker 2008).

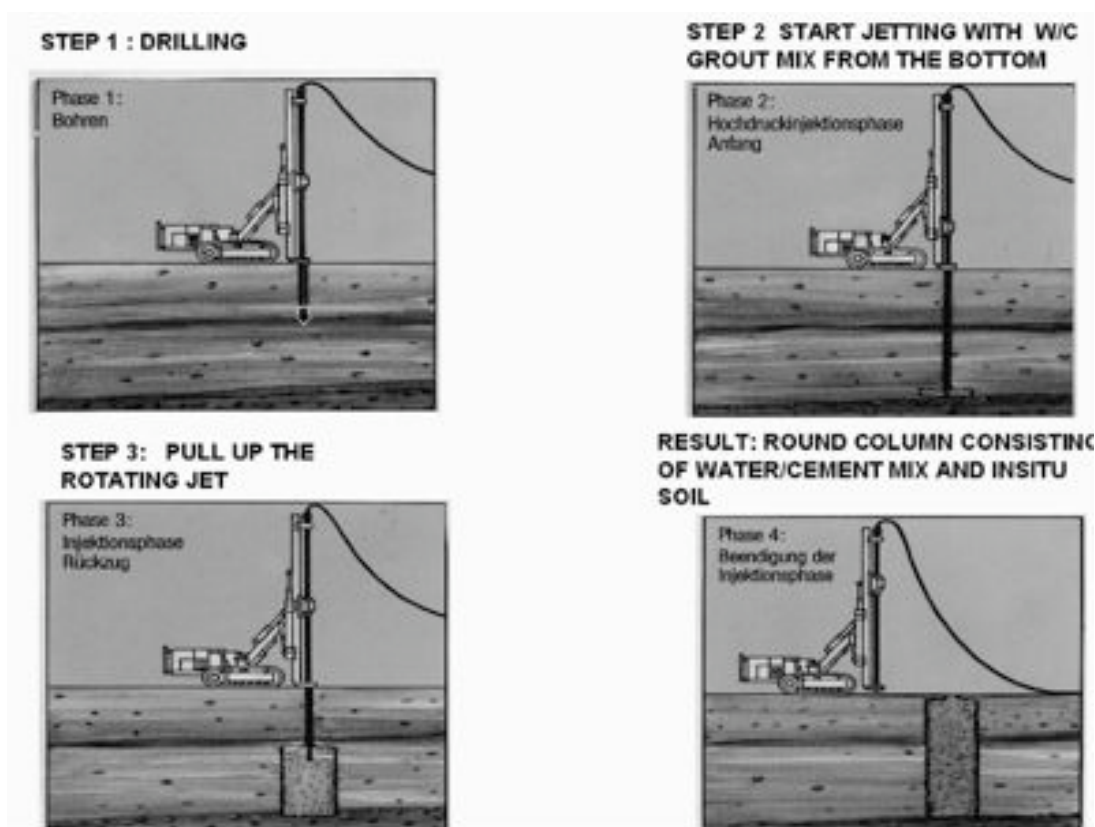


Kuva 23: Suihkuinjektointijohteet. (SFS 2008)

3.2.3 Suihkuinjektoinnin työvaiheet

Suihkuinjektointia pilaria tehtäessä ovat työvaiheet yleensä: poraaminen määräpituuteen asti, suihkuinjektointijohteeseen liitetyn porakruunun vieminen porareian päähän (ellei johdetta ja porakruunua ole käytetty jo poraamisvaiheessa), ja si-deainesuspension suihkuttaminen porakruunun suuttimien läpi. Poraus määräpituuteen tarkoittaa poraamista niin pitkälle, että porakruunun suuttimet ovat suihkutettavan pilarin tavoitetasossa. Suihkuinjektointijohteen pyöritys- ja vetonopeudet sekä nesteiden virtausnopeudet ja pumppauspaineet suihkutuvaiheessa

ovat ennakkosuunnitelman mukaiset. Suihkuinjektoidun pystysuoran pilarin työvaiheita on havainnollistettu kuvassa 24. Suihkuinjektoitua paneelia toteutettaessa ovat työvaiheet samat, mutta suihkuinjektointijohdetta ei pyöritetä ulosvetovaiheessa. (Gazzarini et al. 2005, SFS 2008) Suihkuinjektoinnin aikana ja suihkuinjektoidun elementin sitoutumisaikana on syytä välttää tärinöitä suihkutusalueella, jotta betonin sitoutuminen ei häiriintyisi (RHK 2006).



Kuva 24: Suihkuinjektoidun pystysuoran pilarin työvaiheet (Gazzarini et al. 2005)

Vaakasuorassa suihkuinjektoinnissa toimitaan vastaavalla tavalla kuin pystysuorassa, mutta poraus ja suihkutetus tehdään vaakatasossa tai lähes vaakatasossa ($\pm 20^\circ$ vaakatasosta). Vaakasuuntaisia pilareita ja paneeleja suihkutettaessa on tärkeää tukkia porareiän kaulus nopeasti suihkutuksen päätyttyä, jotta maahan suihkutettu sideainesuspensio ei valuisi saman tien reiästä ulos. (SFS 2008)

Prosessissa syntyvä ylimääräinen liete pääsee tavallisesti valumaan porareiästä maanpinnalle, koska porakruunun halkaisija on suurempi kuin suihkuinjektointijohteen halkaisija. Liette kerätään talteen ennalta sovittuun paikkaan ja sen jatkokäsittelystä huolehditaan. Lietteen paluuvirtauksen tyrehtyessä porausreikä

huuhdellaan ja tarpeen mukaan vähennetään suihkutuspainetta. (Brill et al. 2003, Jääskeläinen 2003, SFS 2008)

Suihkuinjektoidut elementit voidaan raudoittaa lujuuden lisäämiseksi. Lujittavat rakenneosat, kuten tangot, putket tai palkit voidaan asentaa suihkuinjektointitöiden aikana tai niiden jälkeen. (InfraRYL 2006, SFS 2008)

3.3 Suihkuinjektointiparametrit ja suihkuinjektointityön laadunvalvonta

3.3.1 Suihkuinjektointiparametrit

Suomen standardoimisliiton (2008) mukaisesti suihkuinjektoinnin parametrit ovat:

- Sideainesuspension, veden ja ilman paine suihkuinjektointijohteessa.
- Sideainesuspension, veden ja ilman virtausnopeus suihkuinjektointijohteessa.
- Sideainesuspension koostumus.
- Suihkuinjektointijohteen pyörimisnopeus.
- Suihkuinjektointijohteen ulosveto- tai sisäänpanonopeus.

Parametrien vaihteluvälit ovat esillä liitteessä 2. Edellä mainittujen parametrien lisäksi Gazzarini et al. (2005) mainitsevat suihkuinjektointiparametreista myös suihkutussuuttimien lukumäärän ja halkaisijan.

3.3.2 Suihkuinjektointityön laadunvalvonta

Suihkuinjektoinnin laadunvalvonnan minimivaatimuksena on suihkuinjektointiparametrien raportointi ja ylijäämälietteen havainnointi kaikkien rakenneosien osalta. Voidaan olettaa, että vertailukelpoisissa maaperäolosuhteissa samat suihkuinjektointiparametrit tuottavat samat rakenneosan mitat, ominaisuudet ja ylijäämälietteen. Muutaman suihkutetun rakenneosan valmistuttua mitataan rajatusta määrästä rakenneosia niiden mitat ja materiaaliominaisuudet, minkä perusteella voidaan määrittää rakenneosien ominaisuuksien ja suihkuinjektointiparametrien välinen suhde. (Gazzarini 2005, SFS 2008)

Suihkuinjektointityön aikana ja sen päätyttyä seurataan jatkuvasti maasideainesuspension tasoa. Jos suspension pinta laskee esimerkiksi keskeytysten aikana, suihkutetaan pilarin ylintä, tuoretta osaa uudelleen. Havainnot dokumen-

toidaan standardin SFS-EN 12716 mukaiseen pöytäkirjaan. Esimerkit pöytäkirjoista löytyvät liitteistä 3 ja 4. Myös sideainesuspension laadun tarkkailu dokumentoidaan standardin mukaiseen pöytäkirjaan. (SFS 2008, InfraRYL 2006)

InfraRYLin (2006) mukaan suihkuinjektoitujen rakenteiden kelpoisuus osoitetaan seuraavasti: suihkuinjektoitujen pilarien halkaisija ja pituus määritetään pöytäkirjasta ja koepilarin esiin kaivulla. Pilarien koko ja liittyminen toisiinsa testataan poraamalla näyte rakenteellisesti kriittisimmästä kohdasta, koepumppauksin tai kaivamalla rakenne esiin. Suihkuinjektoidun maan lujuus testataan koestamalla suihkuinjektoidusta rakenteesta porattu näytesarja standardin SFS-EN 12716 mukaisesti. Näytteenoton yhteydessä dokumentoidaan havainnot huuhteluvedestä, porauksen eteneminen ja näytehävikki. Koko saatu näyte varastoidaan ja suojataan kuivumiselta, jäätymiseltä ja kolhiintumiselta koestukseen asti. Vedenpitäville rakenteille tehdään vuotomittaus suunnitelma-asiakirjojen mukaisesti.

3.3.3 Suihkuinjektointiparametrien vaikutus pilarin läpimittaan ja lujuuteen

Suihkuinjektoidun pilarin läpimittaan voidaan maalajista riippumatta vaikuttaa suihkuinjektointiparametrien ja suihkuinjektointimenetelmän valinnalla (Hayward Baker 2004, Tektracker 2008). Suihkutuspaine sekä maahan suihkutetun sideainesuspension määrä vaikuttavat sitoutuneen pilarin läpimittaan seuraavasti: suihkutuspainetta nostamalla voidaan kasvattaa suihkuinjektoidun pilarin läpimittaa käytettäessä alle 40 MPa paineita. Käytettäessä yli 40 MPa suihkutuspaineita ei paineen lisäys kasvata saavutettavaa läpimittaa oleellisesti. Maahan suihkutettavan sideainesuspension määrä vaikuttaa pilarin läpimittaan erityisesti yksittäisjärjestelmässä ja paineilmalla avustetussa kaksoisjärjestelmässä, joissa ympäröivän maakerroksen leikkaaminen ja hienoaineksen huuhtelu toteutetaan sideainesuspensiolla. Tällöin maahan pumpatun sementtimäärän nelinkertaistaminen suurentaa suihkuinjektoidun pilarin läpimittaa noin 40%. (Viitala 1993) Kolmoisjärjestelmässä ja korkeapaineisella vesisuihkulla avustetussa kaksoisjärjestelmässä sementtimäärän lisäyksen vaikutus on vähäisempi, sillä maakerroksen leikkaus ja hienonnus tapahtuu veden avulla (Hayward Baker 2004). Kolmoisjärjestelmää käytettäessä lisää maahan pumpatun sementtimäärän kolminkertaistaminen suihkuinjektoidun pilarin läpimittaa vain noin 20%. Suihkutuspaineen vaikutusta pilarin läpimittaan eri järjestelmiä käytettäessä on havainnollistettu taulukossa 3. (Viitala 1993)

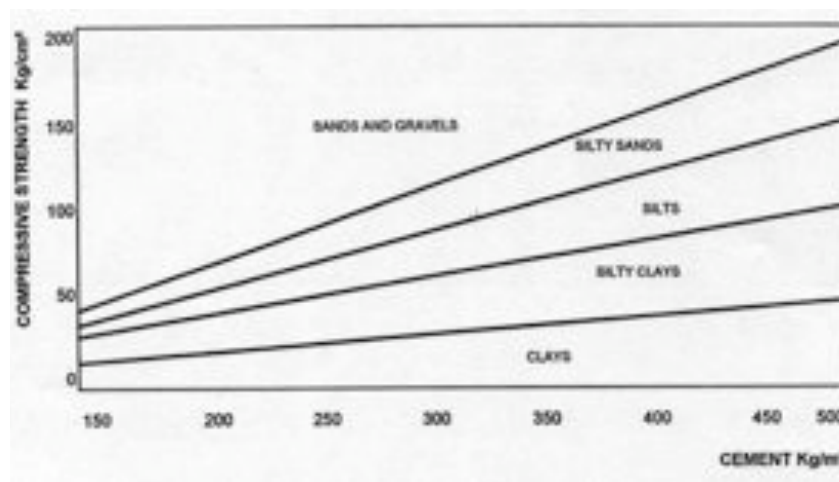
Taulukko 3 : Suihkutuspaineen vaikutus suihkuinjektoidun pilarin läpimittaan. Havaittuja läpimittoja erilaisissa maalajeissa eri järjestelmiä käytettäessä. (Viitala 1993)

Järjestelmä	Suihkutuspaine [MPa]			Suihkuinjektoidun pilarin läpimitta [m]				
	Sementti	Paine-ilma	Vesi	Sa	Hk	saSi	siHk	hkSr
Yksittäisjärjestelmä	25-40 40-60				0,85	0,4-0,5	0,8-0,9	0,9-1,0
Kaksoisjärjestelmä (ilma)	25-40 40-60	0,5-0,6			1,7	0,6-0,8	1,1-1,3	1,3-1,5
Kolmoisjärjestelmä	1,5-4 1,5-4	0,5-0,6	30-40 40-60	1,4		0,8-1,0 1,5-1,7	1,4-1,6 2,0-2,6	2,0-2,4 2,5-2,8

Suihkuinjektointiparametrit vaikuttavat myös suihkuinjektoidun pilarin lujuuteen (Hayward Baker 2004). Erityisesti maahan suihkutetun sideainesuspension määrän lisäyksellä ja sideaineen vesisementtisuhteen optimoinnilla voidaan kasvattaa suihkuinjektoidun rakenteen lujuutta (Viitala 1993). Suihkuinjektoidun rakenteen lujuudenkehitystä eri maalajeissa erilaisilla suihkuinjektointiparametreilla on havainnollistettu Jouko Viitalan diplomityössä (taulukko 4). Taulukon tiedot edustavat saavutettavia lujuuksia keskieuropalaisissa maalajeissa, jotka osittain poikkeavat ominaisuuksiltaan suomalaisista maalajeista. Myös suihkuinjektointiurakoitsijoiden sivuilta löytyy esimerkkejä suihkuinjektoidun rakenteen keskimääräisestä lujuudesta eri maalajeissa eri parametreja käytettäessä. Kuvassa 25 on nähtävissä suihkuinjektoidun rakenteen lujuus suihkuinjektoidun sideainesuspension määrän funktiona. (Tektracker 2008)

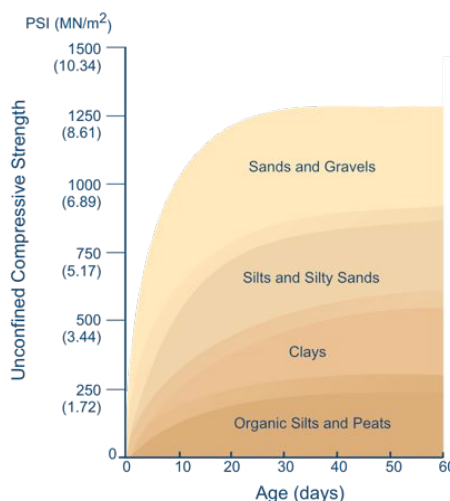
Taulukko 4 : Sideainesuspension koostumuksen vaikutus suihkuinjektoidun rakenteen lujuuteen eri maalajeissa. (Viitala 1993)

Vesi/Sementti suhde	Hiekkainen sora [MPa]	Siltinen hiekka [MPa]	Savinen siltti [MPa]
0,67	12-18	10-14	6-10
1,0	6-10	5-7	3-5



Kuva 25: Suihkuinjektoidun rakenteen puristuslujuus sideainesuspension koostumuksen funktiona. Maalajit ylhäältä alaspäin ovat: hiekat ja sorat, silttiset hiekat, siltit, silttiset savet ja savet. (Tektracker 2008)

Suihkuinjektoidun rakenteen lujuuteen vaikuttavat parametrien lisäksi olennaisesti valittu suihkuinjektointimenetelmä sekä maalaji. Maabetonin lujuuden kehitys tuoreessa suihkuinjektoidussa rakenteessa vaihtelee ja on vaikeaa ennustaa erityisesti kerroksellisissa maalajeissa. (Viitala 1993) Kuva 26 esittää arvion suihkuinjektoidun rakenteen lujuuden kehityksestä eri maalajeissa ajan funktiona (Hayward Baker 2004). Taulukoista 3 ja 4 sekä kuvista 25 ja 26 nähdään, että suurimmat lujuudet saavutetaan hiekka- ja soramaihin suihkuinjektoiduissa pilareissa, kun taas savimaihin ja eloperäisiin siltti- ja turvemaihin suihkuinjektoitujen pilarien lujuudet ovat selkeästi pienemmät.



Kuva 26: Arvio suihkuinjektoidun rakenteen keskimääräisestä puristuslujuuden kehityksestä 60 päivää suihkuinjektoinnin jälkeen. Maalajit ylhäältä alaspäin ovat: hiekat ja sorat, siltit ja silttiset hiekat, savet, eloperäiset siltit ja turpeet. (Hayward Baker 2004)

3.4 Suihkuinjektointimenetelmän soveltuvuus junaratojen painumisongelmien korjaamiseen

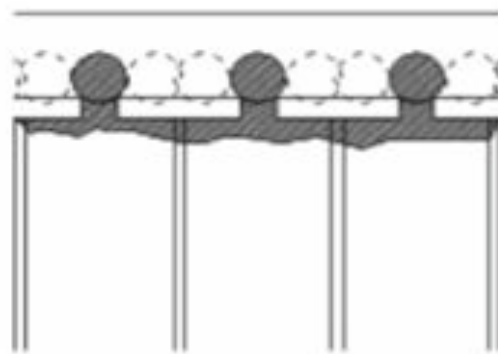
3.4.1 Työskentely liikenteen alaisella raiteella

Erityisesti vilkkailla rataosuuksilla toteuttavissa korjaustöissä on huomioitava jatkuva raideliikenne, mikä rajoittaa liikkumista ratapenkereen päällä, sekä aukean tilan ulottuma (ATU), jonka sisäpuolelle ei saa sijoittaa kiinteitä rakenteita tai laitteita. Aukean tilan ulottuma on esitetty liitteessä 5. Radanpidon turvallisuusohjeissa (TURO) todetaan radalla liikkumisesta ja työskentelystä seuraavaa: ”Liikkumisen tulee ensisijaisesti tapahtua ATUn ulkopuolella, kuten esimerkiksi huoltotiellä tai merkittyjä siirtymäreittejä pitkin. Radan ylittämiseen tulee käyttää taso- ja eritasoristeyksiä. Jos joudutaan työskentelemään niin lähellä liikennöidyn raiteen ATUa, että työkonetta tai sen osa voi liikkua ATUn sisäpuolelle, on junan lähestyessä työkonetta keskeytettävä työskentely ja laskettava kauhat maahan junan ohituksen ajaksi.” Junien ohituksista aiheutuvat katkot radan korjaustöissä on syytä ennakoida jo suunnitteluvaiheessa.

Kaapeleiden, johtojen, ratalaitteiden ja muiden esteiden sijainnit tulee selvittää ennen ratapenkereeseen kohdistuvien töiden aloittamista, ja kaivutöissä tulee noudattaa erityistä huolellisuutta penkereen stabiliteetin vuoksi. Sähköistetyllä radalla työskentely edellyttää radanpidon turvallisuusohjeiden (TURO) mukaisten suojaetäisyyksien noudattamista, sillä ajojohdin ja siihen liittyvät rakenteet ovat hengenvaarallisia. Suojaetäisyydet ovat nähtävissä liitteessä 6. Radan korjaustöihin on annettava aina lupa liikenteenohjaukselta sellaisissa korjaustöissä, joissa kone tai sen osa saattaa joutua ATUn sisäpuolelle. (Rautatievirasto 2008, RHK 2007a) Lisäksi liikenteen alaisella raiteella työskenneltäessä on huomioitava työskentelystä aiheutuva haitta junaliikenteelle; pitkien raidevarausten tekemistä tai alhaisten nopeusrajoitusten asettamista pitkiksi ajoiksi olisi syytä välttää. (RHK 2008b)

3.4.2 Suihkuinjektoitu rakenne ratapenkereessä

Käytettäessä suihkuinjektointimenetelmää ratapenkereissä havaittujen painumaongelmien korjaamisessa muodostetaan paaluhattujen yläpuolelle maabetoninen laatta vaakasuoraan suihkutetuista, toisiaan leikkaavista pilareista. Laatan avulla saadaan penger- ja junakuormat välitettyä tasaisesti paaluhatuille, ja hatuilta edelleen paaluille. Rakenne on esitetty kuvassa 27. Vaihtoehtoisesti voidaan myös toteuttaa vaakasuorat suihkuinjektoidut pilarit paaluhatturivien väleihin, jos paaluhatturivien tarkat sijainnit ovat tiedossa. (RHK 2006)



Kuva 27: Suihkuinjektointimenetelmällä korjattu ratapenger. Vaakasuoraan suihkutetuista, toisiaan leikkaavista pilareista muodostuu maabetoninen laatta paaluhattujen yläpuolelle. (RHK 2006)

3.4.3 Suihkuinjektoidusta rakenteesta aiheutuvat kustannukset

Ratahallintokeskuksen vuonna 2006 julkaisemassa raportissa on suihkuinjektointimenetelmällä toteutetulle yhtenäiselle laattarakenteelle arvioitu metriä kohden suunnilleen samanlaiset kustannukset kuin paalulaattarakenteelle, kun suihkutettavien pilarien pituus on noin 10 m. Suihkutettaessa pilarit vain paaluhattujen väleihin ovat kustannukset ratametriä kohden pienemmät.

3.4.4 Suihkuinjektointimenetelmän edut ja haitat junaratojen painumaongelmien korjaamisessa

Kirjallisuuskatsauksen pohjalta voidaan koota seuraavia suihkuinjektointimenetelmän käytöllä saavutettavia etuja, kun menetelmää käytetään paaluhatturakenteissa havaittujen painumaongelmien korjaamiseen:

- Laattarakenteen avulla estetään pengermateriaalin valuminen ja holvautumisen häiriintyminen. Täten painumisongelman syy poistuu. Suihkuinjektoiduista pilareista muodostettu laatta myös tukee paaluhattuja, mikä parantaa ratapenkereen stabiliteettia. Korjausvaikutus on pitkäaikainen.
- Suihkuinjektoiduista pilareista muodostettua laattaa voidaan vahvistaa suihkutuksen jälkeen asentamalla pilareihin porattuihin reikiin raudotteet.
- Suihkuinjektointi ei aiheuta tärinöitä ympäristöön, joten se ei häiritse junaliikennettä.
- Suihkuinjektointityö voidaan toteuttaa ilman raidevarausta riittävän korkeissa penkereissä, eikä menetelmän käyttö vaadi raiteen purkamista. Korkeissa penkereissä junaliikenteestä aiheutuvat tärinät eivät häiritse betonin sitoutumista, joten liikenne voi jatkua normaalisti töiden aikana, eikä korjaamisesta aiheudu liikennehaittakustannuksia. Betonin sitoutumista voi-

daan nopeuttaa käyttämällä Rapid-sementtiä, ja junaliikenteestä mahdollisesti aiheutuva värinähaitta voidaan minimoida tekemällä työt mahdollisimman rauhalliseen ajankohtaan, kuten esimerkiksi yöllä.

- Suihkuinjektointilaitteisto mahtuu ahtaisiinkin paikkoihin radan varrella, ja menetelmää käytettäessä pystytään huomioimaan aukean tilan ulottuma.
- Paaluhattujen korkeustason kohtuullinen vaihtelu tai vähäinen kallistuminen eivät haittaa suihkuinjektointityön suoritusta, sillä porausta ei tarvitse tehdä aivan paaluhattujen yläpintaan. Jokaisen suihkutettavan pilarin koko saadaan säädettyä suihkutuspainetta muuttamalla. Oikealla suihkutusparametrien valinnalla voidaan varmistaa, että valmiit pilarit tulevat paaluhattuihin kiinni, vaikka poraus olisi tehty huomattavasti paaluhattujen yläpintaa korkeammalle.
- Ratapenkereessä mahdollisesti olevat isot kivet tai muut esteet eivät estä menetelmän käyttöä, sillä niiden kohdalla voidaan käyttää hyväksi esiporausta.
- Toteutettujen suihkuinjektoitujen pilarien päät voidaan kaivaa esille tarkasteluita varten, ja pilareista porattujen näytteiden avulla voidaan selvittää pilarien rakenne raiteen alla. Näin saadaan arvokasta tietoa valmiiden pilarien lujuusominaisuuksista, halkaisijasta, pituudesta, muodosta ja limitymisestä toisiinsa, ja voidaan arvioida menetelmän onnistumista.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta seuraavia haittoja, kun korjataan paaluhattujen painumaongelmia suihkuinjektointimenetelmää käyttäen :

- Suihkuinjektointimenetelmän käyttö edellyttää pitkiä raidevarauksia korjattaessa matalia junapenkereitä. Syynä tähän on se, että junaliikenteestä aiheutuvat värinät voivat matalissa penkereissä häiritä betonin sitoutumista. Pitkistä raidevarauksista aiheutuu suuria liikennehaittakustannuksia.
- Paaluhattujen asema on selvitettävä ennen suihkuinjektointitöiden aloittamista.
- Jos tyhjätila paalujen alla on edennyt jo pitkälle, on hattujen välinen holvi saattanut siirtyä reilusti paaluhattujen yläpuolelle. Tässä tapauksessa voi maahan suunnattu korkeapainesuihku karata paaluhattujen alapuolisiin tyhjätiloihin, jolloin suihkuinjektoitu pilari epäonnistuu. Tämän vuoksi on paaluhattujen alapuoliset tyhjätilat täytettävä ennen suihkuinjektointin aloittamista.
- Junaraiteella työskenneltäessä ovat töiden aikaiset keskeytykset mahdollisia. Suihkuinjektointimenetelmää käytettäessä on varmistuttava suihkutet-

tavan pilarin jatkuvuudesta, joten pilarin tuoreimman osan uudelleensuihkutus on välttämätöntä.

- Suihkuinjektointimenetelmä edellyttää erikoislaitteiston ja osaavien työntekijöiden käyttöä.
- Suihkuinjektointityön lähialueen likaantuminen ylijäämälietteestä on välttämätöntä. Lietteelle on löydettävä sopiva sijoituspaikka radan läheisyydestä, ja sen jatkokäsittelystä on huolehdittava.
- Jos paaluhattujen korkeusasemia ja kallistumisia ei ole selvitetty huolellisesti ennen suihkuinjektointitöiden aloitusta, saatetaan poraus toteuttaa liian lähellä paaluhattujen yläpintaa. Tässä tapauksessa voi poraus pysähtyä paaluhattuun.
- Paaluhattujen kallistumisia ja korkeusaseman vaihteluita ei suihkuinjektointimenetelmää käytettäessä korjata, koska ratapengertä ei avata. Kallistuneilla paaluhatuilla saattaa olla vaikutusta ratapenkereen stabiliteettiin korjauksesta huolimatta.
- Vaakasuuntaisia, pitkiä suihkuinjektoituja pilareita tehtäessä saattaa poraustarkkuus heiketä, jolloin valmiiden pilarien suunnat voivat poiketa suunnitellusta.

Liitteessä 7 on esitetty suihkuinjektointimenetelmän vertailu muihin käytössä oleviin menetelmiin, eli paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttöön, vaakasuorien teräsponttien käyttöön ja stabilointilaattaelementtien asennukseen. Lujitekankaiden tai -verkkojen asennus ei ole vertailussa mukana, koska se soveltuu vain vähäliikenteisille radoille. Teräsbetonilaatan käyttö on jätetty vertailusta pois, koska sen käytöstä painumaongelmien korjauksessa ei Ratahallintokeskuksen mukaan ole vielä kokemuksia. Vertailussa tarkasteltiin korjausmenetelmästä aiheutuvia kustannuksia, menetelmän vaativuutta ja korjausvaikutuksen pitkäaikaisuutta. Lisäksi vertailun kohteena olivat kunkin menetelmän esivalmistelutyöt, työn toteutus ja valmiin rakenteen tarkastelu ja kunnossapito.

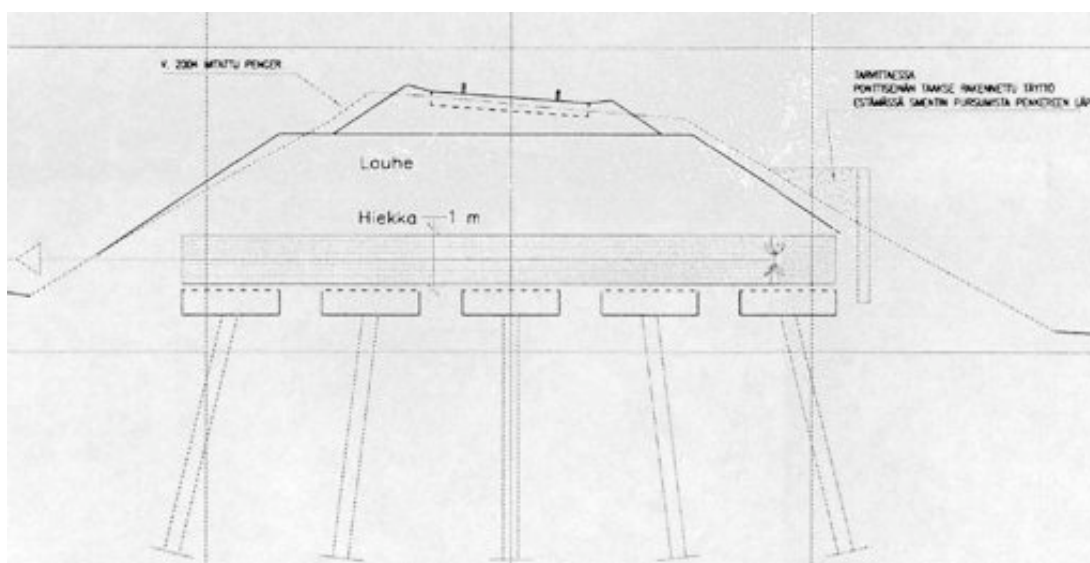
Vertailun pohjalta voidaan todeta, että suihkuinjektointimenetelmä soveltuu korkeiden penkereiden painumaongelmien korjaamiseen hyvin. Paaluhattujen korkeusaseman selvittäminen ja niiden alapuolisten tyhjätilojen täyttäminen tuovat lisää työtä muihin menetelmiin verrattuna, mutta vastaavasti korjaustulokset ovat pitkäaikaisia ja kunnossapidon tarve vähäinen. Lisäksi työt voidaan tehdä raidetta avaamatta ja junaliikennettä häiritsemättä. Matalilla penkereillä nousevat liikennehaittakustannukset merkittäviksi, joten niitä korjattaessa on syytä etsiä muita ratkaisuja.

4 Case: Paaluhattujen korjauskoe rataosuudella Vuohimäki-Kela

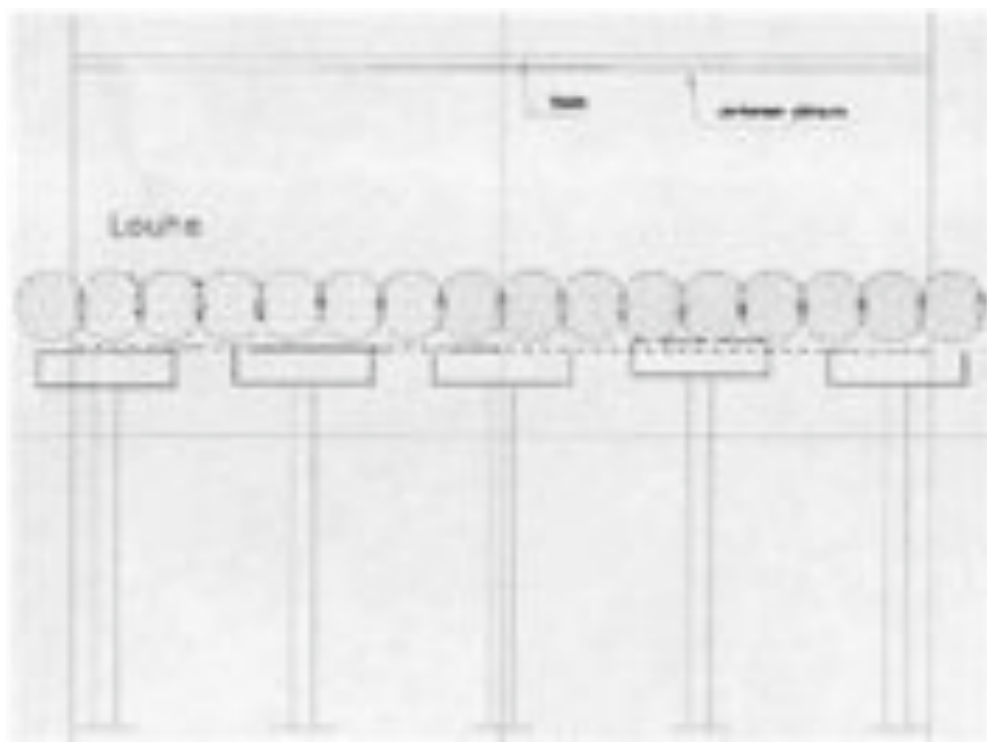
4.1 Koekohteen kuvaus

Paaluhattujen korjauskoe suihkuinjektointimenetelmällä toteutettiin kesä-heinäkuussa 2007 Kirkkonummen ja Turun välisellä junaradalla, rataosuudella Vuohimäki-Kela. Kyseisen radan ongelmalliseksi osoittautuneet paaluhattualueet sijaitsevat pääosin 1980-1990 lukujen vaihteessa rakennettujen rataoikaisujen kohdalla, ja Ratahallintokeskuksen tutkimusten mukaan yleinen vaurio paaluhatturakenteissa on hattujen kallistuminen. Syynä kallistumiseen on paaluhattujen välistä tapahtuva eristyskerroksen valuminen hattujen alapuolelle muodostuneisiin tyhjätiloihin, minkä seurauksena hattujen tuenta häiriintyy ja ne pääsevät kallistumaan. (RHK 2007b)

Vuohimäki-Kela rataosuus on rakennettu korkealle penkereelle. Ratahallintokeskuksen toimesta päätettiin alueella kokeilla korjaustapaa, jossa paaluhattujen yläpuoliseen hiekkakerrokseen rakennetaan suihkuinjektoitujen, toisiaan leikkaavien pilarien muodostama maabetoninen laatta. Suihkuinjektointityön suoritti Lemminkäinen Infra Oy. Kuva 28 on poikkileikkauskuva ja kuva 29 pituusleikkauskuva suihkuinjektointimenetelmällä korjatusta ratapenkereestä. Kuva 29 havainnollistaa ratapenkereeseen muodostuvaa laattarakennetta radan eteläpuolelta.



Kuva 28: Suihkuinjektointimenetelmällä toteutettu maabetoninen pilari paaluhattujen yläpuolisessa hiekkakerroksessa. (Andersson 2007)



Kuva 29: Suunnitelma suihkuinjektoiduista pilareista muodostuvasta laattarakenteesta radan eteläpuolelta. Karjaa sijoittuu kuvassa vasemmalle ja Kirkkonummi oikealle. (Andersson 2007)

Suihkuinjektointitöiden tekeminen korkeassa penkereessä ei edellyttänyt raidevarausta. Sementtimenekin pienentämiseksi määrättiin paaluhattujen alapuolinen tyhjätila täytettäväksi ennen töiden aloitusta, ja maabetonin kovettumisen nopeuttamiseksi ehdotettiin käytettävän nopeasti kovettuvaa sementtiä. Tyhjätiloja rataosuudella oli aiemmin korjattu puhaltamalla kevytsoraa paaluhattujen alle.

Korjauskokeessa suihkuinjektointi tehtiin kohdalla km 43+300 ... 43+310. Suihkuinjektoitavalle ratapituudelle osui 5 paaluhatturiviä, jotka numeroitiin juoksevasti radan pituussuunnassa siten, että Karjaata lähinnä oleva paaluhatturivi oli numero 1 ja Kirkkonummea lähinnä oleva hatturivi numero 5. Paaluhatturivien numerointi on esillä liitteessä 8, jossa on kuvattu myös reunimmaisten paaluhattujen korkeusaseman erot sekä niiden etäisyydet toisistaan.

Radan liikkeitä täyttö- ja injektointitöiden aikana seurattiin silmämääräisesti sekä säännöllisin tarkkavaaituksin, jotka tehtiin ratapenkereen päällä. Urakan ajaksi junien nopeusrajoitus työmaan kohdalla laskettiin nopeuteen 40 km/h, sillä radan kaartuminen työstettävällä rataosuudella häikäisi lähestyvien junien havaitsemista. Työkoneet keskeytettiin aina junan ohituksen ajaksi. Junaliikenteen tarkkailusta

huolehti koko urakan ajan Ratahallintokeskuksen osoittama turvamies, ja kaikki radan läheisyydessä liikkuneet henkilöt käyttivät varoitusvaatetusta. Lisäksi jokainen työntekijä kävi Ratahallintokeskuksen järjestämän turvallisuuskoulutuksen.

4.2 Työn toteutus

4.2.1 Koekohteessa käytetty suihkuinjektointilaitteisto

Koekohteessa sekä poraus että suihkuinjektointi tehtiin samalla laitteella yksittäisjärjestelmää käyttäen. Pienen kokonsa puolesta laite soveltui työskentelyyn ahtaassa tilassa radan vieressä. Suihkuinjektointijohteen tangot olivat 1,5 m pitkiä, ja suihkutukseen tuli lyhyitä taukoja johteen lyhentämisestä johtuen.

Sekoitus- ja pumppausasema sijoitettiin kauemmas radasta vanhan huoltotien varteen. Sekoitus- ja pumppausaseman viereen tehtiin vesiallas, sillä tyhjätilojen täytöissä ja suihkuinjektoinnissa tarvittu vesi täytyi kuljettaa työmaalle säiliöautolla. Radan vieressä suihkuinjektointialueella oli lisäksi lietepumppu, jolla pumpattiin injektoinnissa syntynyt sementtiliete läheiseen läjityspaikkaan.

4.2.2 Esivalmistelut

Työt aloitettiin suihkuinjektoitavan osuuden reunimmaisten paaluhattujen esiin kaivulla, mikä paljasti hattujen alapuoliset tyhjätilat. Hattujen alle puhallettu kevytsorapatja oli vielä havaittavissa, mutta maa oli painunut reilusti puhalluksen jälkeen. Tyhjätilat päätettiin täyttää sementtimassalla.

Ensin täytettiin paaluhatturivin 1 alapuoliset tyhjätilat. Täyttötyöt tehtiin suojaputkien kautta vaakaan paaluhattujen alle. Täyttö aloitettiin radan pohjoispuolelta, mutta työt jouduttiin keskeyttämään pian aloituksen jälkeen, sillä pohjoispuolen ratapenkereessä havaittiin kohoamaa. Johdetta vedettiin 2 m radan keskustaa kohden ja täyttöä jatkettiin, jolloin kohoamista ei enää esiintynyt. Paaluhatturivin 1 jälkeen täytettiin paaluhatturivien 3 ja 5 alapuoliset tyhjätilat vastaavalla tavalla suojaputkien kautta, eikä työn aikana ilmennyt kohoamista ratapenkereen kummallakaan puolella.

Seuraavana päivänä reunimmaiset paaluhattut kaivettiin esiin tarkasteluita varten. Tarkastuskaivuissa huomattiin, että tyhjätiloihin puristettu sementtimassa oli vajonnut syvempiin maakerroksiin, ja tyhjätilat paaluhattujen alla olivat edelleen 0,1...0,2 m. Täyttöä piti jatkaa, mutta ennen työn aloitusta päätettiin paaluhattujen kulmiin asentaa 2,5 m pitkät harjateräksiset. Terästen avulla havaittiin kunkin paaluhattun sijainti, korkeusasema ja pituussuuntaiset kallistukset. Suurimmillaan reunimmaisten paaluhattujen väliset korkeuserot olivat 42 cm, ja hattujen etäisyys

vaihteli 11,00 m ja 11,35 m välillä. Harjaterästen korkeusasemat ja reunimmaisten paaluhattujen etäisyys toisistaan näkyvät liitteessä 8.

Uusintatäyttö tehtiin poraamalla vinosti (kaltevuudella 0,6 m – 0,05...0,06 m) paaluhattujen alapuolelle ilman suojaputkea. Sementtimassa työnnettiin tyhjätiloihin tyhjäkäynnillä, eikä ratapenkereessä ilmennyt kohoumia. Seuraavan päivän kaivuissa todettiin tyhjätilojen täyttyneen hyvin koko suihkuinjektoitavalta rataosuudelta. Kuvassa 30 näkyy tarkastuskaivuissa irrotettu koekappale, jossa tyhjätiloihin pumpattu sementtimassa on kovettunut maa-aineksen ja tyhjätilojen pohjalla olleen kevytsoran kanssa.



Kuva 30: Tarkastuskaivussa irrotettu koekappale. Tyhjätiloihin pumpattu sementtimassa on kovettunut maa-aineksen ja tyhjätilojen pohjalla olleen kevytsoran kanssa.

Ennen suihkuinjektointityön aloittamista vahvistettiin ratapenger ruiskubetonilla radan eteläpuolelta koko suihkuinjektoitavalta pituudelta. Ruiskutus toteutettiin seuraavalla tavalla: Penkereeseen asennettiin putket suihkuinjektointia ja mahdollista myöhempää tyhjätilojen täyttöä varten, ja tämän jälkeen ratapenkereen päälle asetettiin teräsverkko raudoitukseksi. Lopuksi betoni ruiskutettiin penkereeseen yhtenä kerroksena. Suihkuinjektointia varten asennettujen putkien kautta pystytettiin suihkuinjektointi toteuttamaan ruiskubetonoitua seinämää rikkomatta, ja niiden avulla saatiin porareikä tukittua suihkuinjektoinnin päätyttyä. Kuvassa 31 on nähtävissä valmis ruiskubetonoitu ratapenger, jossa erottuvat siihen asennetut suihkuinjektointi- ja täyttöputket.



Kuva 31: Ruiskubetonoitu ratapenger. Ylhäällä putket suihkuinjektointia varten ja alhaalla putket mahdollisia tyhjätilojen täyttöjä varten.

4.2.3 Suihkuinjektointi

Suihkuinjektoitavia pilareita mahtui vahvistettavaan alueeseen yhteensä 16 kappaletta. Pilarit numeroitiin juoksevasti siten, että Karjaan päässä oli pilari 1 ja Kirkkonummen päässä pilari 16. Paaluhattujen korkeusaseman vaihteluista johtuen oli pilareiden suihkutuskorkeus suunniteltu korkeimman paaluhatun sijainnin mukaan. Sideaineena koekohteessa käytettiin sementtiä.

Suihkuinjektointi aloitettiin pilarista 1. Suihkuinjektointijohde huuhdeltiin radan eteläpuolelta 12,4 m määräpituuteen vesihuuhtelulla. Tarkkavaaitustulosten perusteella ei rataksikoissa ilmennyt haitallista liikettä porauksen aikana, mutta vuotavaa ratapengertä jouduttiin parantelemaan kaivinkoneella radan pohjoispuolella.

Pilarin 1 suihkuinjektointi toteutettiin paineella 40 MPa. Suihkutuksen alettua puhkesi penger välittömästi radan pohjoispuolelta (kuva 32). Vuotokohtia yritettiin tukkia läjittämällä niiden päälle maata kaivinkoneella, ja lisäksi suutinta liikuteltiin porareiässä edestakaisin, jotta lietteen paluuvirtaus saataisiin siirtymään radan eteläpuolelle. Yrityksistä huolimatta valui sementtiliete porareiän sijaan pohjoispuolen penkereen läpi, josta se läjitettiin saman tien kaivinkoneella ratapenkereeseen. Kun suihkutusta oli tehty noin 1 - 1,5 m havaittiin painuma rai-desepelin ja penkereen rajakohdassa radan pohjoispuolella. Painuma ei aiheuttanut haitallista liikettä rataksikoihin, joten suihkutusta jatkettiin. Suihkuin-

jektointijohteen lyhentämisestä johtuneen suihkutustauon aikana muodostui ratapenkereeseen uusi painuma raidesepelipenkereelle oikean kiskon viereen. Uuden painuman suuruus oli 0,7 m, joten pilarin 1 suihkutusta keskeytettiin ratatyön valvojan päätöksestä. Työt siirrettiin yöhön, sillä yöllä junaliikennettä oli vähemmän.



Kuva 32: Pilarin 1 suihkutuksen aikana puhkesi pengeri radan pohjoispuolelta.

Suihkuinjektointia jatkettiin seuraavana yönä pilarista 8. Poraus pysähtyi 5 m kohdalla esteeseen, joka oli joko lohkare tai kallistunut paaluhattu. Koska porausta ei saatu huuhtelusta huolimatta etenemään, päätettiin suihkuttaa pilarin alkuosa 3,5 m pituudelta. Suihkutuksen alettua muodostui eteläpuoleiseen ratapenkereeseen painuma, joten suihkutusta lopetettiin pilarin 8 alkuosan valmistuttua. Tarkkavaahtuksen perusteella todettiin, ettei painumasta ollut aiheutunut haitallista liikettä ratakiskoihin. Pilarien 1 ja 8 suihkutuksissa syntyneet painumat korjattiin samana yönä soravaunun tuomalla raidesepelillä.

Suihkuinjektointia jatkettiin pienemmillä suihkutuspaineilla ja tehostetulla painumatarkkailulla. Pienennetyllä suihkutuspaineella päätettiin ensin suihkuttaa koepilari, jonka onnistumisen perusteella määritettäisiin loppujen pilarien suihkutuspäätökset. Koepilarin suihkuinjektoinnissa päätettiin pitää tauko suihkutuksen edettyä pohjoispuolen raiteen kohdalle, jotta pengertä pystyttäisiin tarkkailemaan useamman junan ylityksen ajan.

Pienennetyllä suihkutuspaineella toteutettiin ensimmäisenä pilari 2. Penger vuoti suihkutuksen aikana radan pohjoispuolelta suihkutettavan pilarin yläosasta. Suihkutuksessa pidettiin suunnitelman mukaisesti tauko sen edettyä pohjoispuolen rai-

teen kohdalle, ja tauon aikana tarkkailtiin pilarin ylittäneiden junien vaikutusta ratapenkereeseen. Koska junista ei aiheutunut painumia, eikä ratakiskoissa mitattu haitallista liikettä, suihkutettiin pilarin 2 loppuosa tauoitta. Suihkutuksen päätyttyä tukittiin porareikä nopeasti.

Ennen tutkimuskaivua päätettiin tehdä vielä pilari 3. Poraus eteni ongelmitta määräpituuteen saakka, ja suihkutusta saatiin käyntiin nopeasti. Suihkutuspainetta nostettiin hieman pilarin 2 suihkutuspainetta korkeammaksi. Pohjoispuolen ratapenger vuoti yläosastaan koko suihkutuksen ajan. Vuotanut liete läjitettiin kaivinkoneella ratapenkereeseen. Penkereeseen ei syntynyt painumia pohjoispuolelisen ratakiskon kohdalla pidetyn suihkutustauon aikana, mutta suihkutuksen siirryttyä radan eteläpuolelle havaittiin raidesepelialueella painuma. Suihkutusta jatkettiin painumasta huolimatta, jonka seuraukseni pehmeni maa myös ruiskubetonoidun seinämän yläreunassa. Tarkkavaaituskokein todettiin, että painumista ei aiheutunut ratakiskoihin liikettä. Suihkutuksen päätyttyä seurattiin rataa vielä useamman junan ohituksen ajan, mutta uusia painumia ei syntynyt eivätkä vanhat painumat kasvaneet. Kuvassa 33 ovat nähtävissä painumat, jotka syntyivät ratapenkereeseen pilarin 3 suihkuinjektoinnin aikana.



Kuva 33: Pilarin 3 suihkuinjektoinnista aiheutuneet painumat. Kuvan vasemmassa reunassa olevan ruiskubetonoidun seinämän yläosaan muodostui sortumareikä, ja oikeassa reunassa olevan ratakiskon viereen laaja painuma suihkuinjektoinnin edettyä radan eteläpuolelle.

Pilareiden 2 ja 3 sijainnit ja poikkileikkausmitat tarkastettiin kaivamalla niiden päädyt esiin radan pohjoispuolelta. Pilari 2 oli muodostunut ensimmäisen paaluhatturivin päälle, kun taas pilari 3 oli osittain toisen paaluhatturivin päällä ja osit-

tain hatturivien välissä. Pilarit eivät leikanneet toisiaan. Pienemmällä paineella suihkutettu pilari 2 oli päädyistä 0,90 m leveä ja 0,80 m korkea, mutta sen poikki-leikkaus kaventui hieman syvemmälle penkereeseen kaivettaessa. Suuremmalla paineella suihkutettu pilari 3 oli päädyistä 0,75 m leveä ja 0,70 m korkea, ja syvemmälle kaivettaessa nähtiin sen levinneen kohti penkereen yläosaa. Molemmat pilarit olivat rakenteeltaan tiiviitä ja vaikuttivat kovilta kaivinkoneen kauhalla lyötäessä. Pilareista irrotettiin kaivun yhteydessä pienet koepalat niiden rakenteen ja lujuuden selvittämistä varten. Kuvassa 34 näkyvät esiin kaivetut pilarit 2 ja 3 suhteessa niiden alla oleviin paaluhatturiveihin.



Kuva 34: Radan pohjoispuolella tehdyssä kaivussa tarkastellut pilarit. Kuvassa oikealla näkyvä pilari 2 oli muodostunut kokonaan ensimmäisen paaluhatturivin päälle, ja vasemmalla näkyvä pilari 3 oli muodostunut osittain toisen paaluhatturivin päälle.

Onnistuneiden koepilarien suihkutuksen jälkeen jatkui suihkuinjektointi kesken jääneestä pilarista 1. Poraus tehtiin 7,7 m asti, ja suihkutus käynnistyi nopeasti. Ratapenkereeseen muodostui painuma, kun suihkutusta oli edennyt pohjoispuoleisen rataakselin kohdalle. Tarkkavaaituksella tarkastettiin, ettei painumasta aiheutunut haitallista liikettä rataakseliin, ja suihkutusta jatkettiin. Kun suihkutusta eteni radan eteläpuolelle, nousi sideainesuspensio maaperästä ruiskubetoniseinäman yläreunassa olleeseen sortumareikään. Lisäksi sideainesuspensiota valui ulos pilarin 3 suihkutusta varten asennetusta muoviputkesta. Valunut sideainesuspensio pumpattiin lietteen mukana läjityspaikkaan. Valumisesta huolimatta suihkutettiin pilari 1 loppuun. Suihkutuksen päättyessä ehti sideainesuspensiota päästä karkuun, sillä porareian tukkimisessa oli ongelmia.

Seuraavaksi suihkuinjektoitiin pilari 9. Poraus eteni ongelmitta määräpituuteen saakka, ja myös suihkutusta tehtiin keskeytyksittä radan pohjoispuolella. Suihkutuksen lähestyessä radan eteläpuolta painui ratapenger ruiskubetonoidun seinämän yläosasta. Painumasta ei aiheutunut haitallista liikettä ratakiskoihin, joten suihkutusta jatkettiin pilarin 9 loppuun asti. Penger ei vuotanut porauksen eikä suihkutuksen aikana radan kummaltakaan puolelta, mutta suihkutuksen loppuvaiheessa pääsi sideainesuspensiota karkuun, sillä porareikää ei saatu tukittua nopeasti. Ongelman aiheutti suihkuinjektointia varten asennettuun putkeen kertynyt kivi- ja hiekkakerros, minkä vuoksi porakruunua ei saatu vedettyä putkesta ulos (kuva 35). Porareian tukkimismekanismia paranneltiin ennen seuraavien pilarien suihkuinjektointia, jotta sementtimassan karkaamiselta vältyttäisiin jatkossa.



Kuva 35: Pilarin 9 suihkuinjektoinnissa putkeen kertynyt kivi ja hiekkakerros, joka vaikeutti porareian tukkimista.

Suihkuinjektointia jatkettiin pilarista 14. Poraus ja suihkutusta etenivät ongelmitta koko pilarin pituudelta, vaikka pohjoispuolen ratapenger vuoti yläosastaan suihkutuksen ajan. Vuotanut liete läjitettiin kaivinkoneella ratapenkereeseen. Suihkutuksen lopussa porareikä saatiin tukittua nopeasti.

Pilarin 14 jälkeen suihkuinjektoitiin loput pilarit järjestyksessä 7, 12, 16, 11, 15, 6, 10, 4 ja 13. Penger vuoti radan pohjoispuolella suihkutettaessa pilareita 12, 11, 6, 4 ja 13. Vuoto oli kuitenkin vähäistä, ja se hallittiin kaivinkoneella. Lisäksi pilarien 16 ja 11 suihkutusta aiheutti painumia ratapenkereeseen raidesepelialueelle. Pilarin 16 osalta syntyi painuma radan eteläpuolelle vasta junan ylittäessä pilarin suihkutuksen päättyttyä, kun taas pilarin 11 kohdalla syntyi painuma radan pohjoispuolel-

le suihkutustauon aikana. Tauko pidettiin suuttimen tukkiutumisen vuoksi. Raidesepelialueella ilmenneiden painumien lisäksi kasvoi painuma radan eteläpuolella ruiskubetonoidun seinämän ja ratapenkereen välissä, kun suihkutettiin pilareita 15, 10 ja 4 (kuva 36). Tarkkavaaitustulosten perusteella ei rataakiskoissa ilmennyt haitallista liikettä, joten kaikki pilarit suihkutettiin loppuun painumista huolimatta. Pilarien 7, 10 ja 4 suihkutuksen jälkeen täytettiin ruiskubetoniseinämän ja ratapenkereen välistä tyhjättilaa sideainesuspensiolla.



Kuva 36: Painuma radan eteläpuolella, ruiskubetonoidun seinämän ja ratapenkereen välissä kasvoi suihkutettaessa pilareita 15, 10 ja 4.

Viimeiseksi suihkutettiin vielä kesken jäänyt pilari 8 kahdessa osassa. Suihkutuksen aikana pohjoispuolen ratapenger vuoti runsaasti alaosaan ja rataakiskon viereen muodostui painuma. Vuotokohtia tukittiin koko suihkutuksen ajan kaivinkoneella, ja vuotanut liete läjitettiin ratapenkereeseen. Painumasta ja vuodosta ei kuitenkaan aiheutunut haitallista liikettä rataakiskoihin, joten pilari 8 suihkutettiin valmiiksi.

Suihkuinjektoinnin päätyttyä tehtiin alueella tutkimuskaivu. Kaivun yhteydessä porattiin muutamista pilareista näytteet, jonka jälkeen ratapenger korjattiin entiseen muotoonsa ja alue maisemoitiin muiltakin osin vanhaan kuntoonsa. Urakan päätyttyä jatkui raideliikenne entiseen tapansa, ja vanhat nopeusrajoituksen palasivat käyttöön.

4.3 Tulokset

4.3.1 Suihkuinjektoitu rakenne

Viimeisen pilarin suihkutusta seuranneena päivänä suoritettiin tutkimuskaivut, joissa koko suihkuinjektoitu pilaririvistö kaivettiin esille lähempää tarkastelua var-

ten. Pilarit olivat päädyistään pääosin hyvän muotoisia, kokoisia ja poikkileikkaukseltaan symmetrisiä, mutta useimmat niistä kapenivat kaivettaessa syvemmälle penkereen keskustaa kohti. Tästä johtuen poikkileikkausmittoja ei otettu heti pilarien päädyistä.

Suurin osa pilareista sijaitsi toisiinsa nähden samassa tasossa, mutta ne eivät muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta leikanneet toisiaan. Syynä tähän olivat pilarien suunniteltua pienemmät poikkileikkaukset ja muutamien pilarien vinous paaluhatturiveihin nähden. Poikkileikkausten kokoon oli vaikuttanut eniten suunniteltua matalampi suihkutuspaine, johon oli päädytty ratapenkereessä ilmenneiden painumien vuoksi. Radan alle ei muodostunut yhtenäistä laattaa, vaan ainoastaan rivistö yksittäisiä suihkuinjektoituja pilareita. Kuvassa 37 on nähtävissä pilarien kaventuminen radan keskustaa kohti.



Kuva 37: Pilarien kaventuminen radan keskustaa kohti ylhäältä päin kuvattuna.

4.3.2 Pilareista poratut näytteet

Tutkimuskaivujen jälkeen porattiin pilarista 9 näyte 1,5 m pituudelta sen rakenteen ja lujuusominaisuuksien selvittämistä varten. Näytteestä huomattiin, ettei pilari 9 ollut muodostunut täydellisesti koko pituudeltaan, vaan sen rakenne muuttui 1,2 m kohdalla kiviseksi (kuva 38). Kivisissä kohdissa ei sideaine ollut sitonut maainesta yhteen. Ensimmäisestä näytteestä tehtyjen havaintojen perusteella päätettiin pilarista 9 ja viereisestä pilarista 10 porata näytteet koko pituudelta, jotta muutkin mahdolliset rakennepoikkeamat selviäisivät.



Kuva 38: Pilarista 9 poratussa näytteessä havaittiin rakennemuutos 1,2 m kohdalla.

Uusien näytteiden perusteella todettiin, että pilari 10 oli 4,8 m pituudelta hyvin muodostunut. Pilarin rakenteessa erottui hienojakoisen maa-aineksen seassa paikoin myös isohkoja kiviä, jotka olivat sitoutuneet tiukasti sideainesuspensioon. Ainoastaan näytteen loppuosassa oli irtonaista maa-ainesta.

Pilarista 9 otetusta uusintanäytteestä nähtiin, ettei pilari ollut muodostunut kunnolla välillä 1,2 m – 1,5 m. Tällä välillä muuttui pilarin rakenne kiinteästä maabetonista löyhäksi hiekka- ja kivimassaksi. Myös pilarin 9 loppuosa noin 3 m eteenpäin näytti olevan löyhää maa-ainesta.

4.3.3 Koekohteen suihkuinjektoinnissa havaitut ongelmat

Koekohteen toteutuksessa ilmeni muutamia ennalta arvaamattomia vaikeuksia, jotka liittyivät työskentelyyn liikenteen alaisella raiteella. Suurimmat ongelmat ja niiden edellyttämät toimenpiteet on koottu alla olevaan listaan.

1. Ratapenkereen pehmentyminen

Ratapenkereen pehmentyminen suihkutuvaiheessa aiheutti painumia radan kummallekin puolelle, minkä vuoksi raiteiden liikkeitä oli seurattava jatkuvasti tarkkavaatuisin. Painumia muodostui erityisesti suihkutustaukojen aikana. Painumien vuoksi jouduttiin suihkutuksessa pitämään taukoja ja syntyneet painumat täytyi korjata, mikä hidasti työn etenemistä. Ratapenkereen pehmentyminen aiheutti myös sementtilietteen virtauksen porareian sijaan radan pohjoispuolen penkereen läpi useiden pilarien suihkutuksessa. Vuodosta johtuen ei ylijäämälietettä saatu pumpattua läjityspaikkaan, vaan lietteenkäsittely ratapenkereeseen jouduttiin hoitamaan kaivinkoneavusteisesti. Vuotokohtien tukkiminen aiheutti lisää työtä. Ra-

tapenkereen pehmentyminen ruiskubetonoidun seinämän vieressä aiheutti työturvallisuusriskin penkereellä liikkuneille työntekijöille.

2. Porareiän tukkiminen suihkuinjektoinnin päätyttyä

Porareiän tukkimisessa ilmeni ongelmia useiden pilarien kohdalla, mistä johtuen sideainesuspensiota karkasi huomattavia määriä suihkutuksen päättyessä. Tämä saattoi heikentää pilarien muodostumista, ja porareiän tukkimismekanismin paranteluun kului aikaa ja vaivaa. Lisäksi huonosti toimivat mekanismit aiheuttivat työturvallisuusriskin porareiän lähellä seisoneille työntekijöille.

3. Ongelmat tyhjätilojen täytössä

Paaluhattujen alapuoliset tyhjätilat piti täyttää useaan kertaan, mikä lisäsi sementtimenekkiiä ja aiheutti lisää työtä. Reunimmaisat paaluhattut voitiin kaivaa esiin, mutta keskimmäisten paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttymisestä ei voitu varmistua.

4. Esteet porauksen tiellä

Porauksen tielle tuleva este voi olla joko kallistunut paaluhattu tai iso kivi. Kivien läpi voidaan porata, kun taas kallistuneen paaluhattun läpi ei saada porata. Tästä johtuen oli koekohteessa porauksen tielle tulleet esteet selvitettävä ennen kuin porausta voitiin jatkaa.

4.3.4 Lopputulos

Yhtenäisen laattarakenteen muodostaminen paaluhattujen yläpuolelle suihkuinjektointimenetelmällä ei onnistunut koekohteessa. Ratapenkereeseen suihkuinjektoidut pilarit olivat timanttinäytteiden perusteella kuitenkin kovia, ja tutkimuskaivun perusteella ne sijoittuivat osittain paaluhatturivien väleihin. Tarkasteluiden perusteella on korjattu rataosuus painunut vähemmän kuin vieressä oleva, paalulaatan varaan rakennettu korjaamaton rataosuus.

Yksittäisten suihkuinjektoitujen pilarien vaikutusta paaluhatturakenteen holvautumiseen ei ole tutkittu tarkemmin. Osuessaan paaluhatturivien väleihin estävät pilarit pengermateriaalin valumista hattujen alapuolisiin tyhjätiloihin ja tukevat paaluhattuja. Tästä johtuen ratapenkereen stabiliteetti paranee ja radan kunnossapidon tarve vähenee. Yksittäiset pilarit eivät kuitenkaan tuki paaluhattujen välejä radan pitkittäissuunnassa, joten paikoittain pengermateriaalin valuminen jatkuu korjauksesta huolimatta.

Koekohteessa huomattiin suihkuinjektointimenetelmään liittyviä ongelmia, kun suihkutusta tehdään junaliikenteen alaiseen ratapenkereeseen. Keskeytyksistä ja on-

gelmista johtuen venyi suunniteltu aikataulu jonkin verran. Lisäksi työturvallisuuden oli kiinnitettävä erityistä huomiota koko urakan ajan.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Paaluhatturakenteiden varaan perustettujen junaratojen painumaongelmiin on haettu ratkaisua keveistä ja raskaista korjausmenetelmistä. Korjausmenetelmää valittaessa on huomioitava korjausvaikutuksen pitkäaikaisuus, raidevarauksen pituus, menetelmän mahdollisesti edellyttämä raiteen avaaminen ja liikennekatko, sekä menetelmästä aiheutuvat kustannukset. Optimaalisessa ratkaisussa saadaan korjaustyöt tehtyä ilman radan avaamista ja raidevarausta siten, että korjausvaikutus on pysyvä.

Paaluhatturakenteiden painumaongelmat johtuvat siitä, ettei maa hattujen välissä holvaudu suunnitellun mukaisesti vaan painuu aiheuttaen tyhjätiloja paaluhattujen alle. Tämän seurauksena paaluhattujen tuenta häiriintyy ja ne pääsevät kallistumaan. Syynä holvautumisen epäonnistumiseen voidaan pitää junaradalle tyypillisiä olosuhteita, kuten junista aiheutuvaa tärinää, runsaita sateita sekä veden jäätymistä ja sulamista ratapenkereessä. Erilaisia korjausmenetelmiä kokeilemalla on huomattu, että maan painuminen hattujen välissä voidaan estää pysyvästi asentamalla hattujen yläpintaan stabilointielementti. Stabilointielementtien käyttö edellyttää kuitenkin raiteen avaamista ja junaliikenteen katkaisemista, mistä aiheutuu suuria liikennehaittakustannuksia.

Eräs vaihtoehto painumaongelmien pysyvään ratkaisuun on yhtenäisen maabetonisen laatan valmistaminen paaluhattujen yläpintaan suihkuinjektointimenetelmää käyttäen. Suihkuinjektointimenetelmän käyttö ei edellytä radan avaamista tai pitkää raidevarausta korkeissa penkereissä, joten junaliikenne voi jatkua normaalisti korjaustöiden aikana. Laatta muodostetaan suihkuttamalla ratapenkereeseen rivi vaakasuoria, toisiaan leikkaavia pilareita. Laatta voidaan raudoittaa jälkikäteen lujuuden parantamiseksi.

Suihkuinjektointimenetelmässä maahan suunnataan korkeapaineinen, pieniläpimittainen suihku, joka leikkaa ja osittain syrjäyttää maata. Suihkutukseen käytetty sideainesuspensio sekoittuu maa-aineksen kanssa, ja ylimääräinen liete pääsee virtaamaan porareiän kautta maan pinnalle. Ensimmäisenä työvaiheena vaakasuoria suihkuinjektoituja pilareita työstettäessä on suihkuinjektointijohteen poraus määräpituuteen. Tämän jälkeen aloitetaan suihkutusta siten, että suihkuinjektointijohtetta pyöritetään ja nostetaan samanaikaisesti ennalta sovitulla nopeudella. Suihkutuksen päätyttyä tukitaan porareikä nopeasti. Maa-aines ja siihen sekoittunut sideainesuspensio sitoutuvat maabetoniseksi pilariksi, ja sitoutumisajan täytyttyä voidaan pilariin asentaa tarvittaessa rauditus.

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella suihkuinjektointimenetelmän soveltuvuutta junaratojen painumaongelmien korjaamiseen. Tutkimuksessa suihkuinjektointimenetelmää verrattiin muihin käytössä oleviin korjausmenetelmiin. Suihkuinjektointimenetelmään perehdyttiin kirjallisuuskatsauksen avulla, ja lisäksi työssä esiteltiin kesällä 2007 toteutettu koekohte. Koekohteen toteutuksessa havaittiin ongelmia, jotka liittyivät junaliikenteen alaisen ratapenkereen suihkuinjektointiin.

Suihkuinjektointimenetelmästä on kirjallisuutta runsaasti, mutta suurin osa kirjallisuudesta keskittyy pystysuoriin, vakaisissa oloissa toteutettuihin pilarirakenteisiin. Kirjallisuuskatsauksen perusteella löydettiin useita suihkuinjektointimenetelmän käyttöä puoltavia tekijöitä junaratojen painumaongelmien korjaamisessa. Menetelmän korjausvaikutus on pitkäaikainen, sillä maabetonisen laatan avulla saadaan junaradoilla havaitun painumaongelman syy eliminoitua kokonaan. Lisäksi raide-liikenne voi jatkua korkeissa penkereissä korjaustoimenpiteiden aikana, sillä menetelmästä ei aiheudu tärinöitä ympäristöön eivätkä junaliikenteen aiheuttamat tärinät vaikuta betonin sitoutumiseen. Ahtaissa radanvarsissa työskentelyä ajatellen on suihkuinjektointimenetelmän etuna myös suihkuinjektointilaitteiston pieni koko. Paaluhattujen kallistuminen ei estä menetelmän käyttöä, sillä porausta ei tarvitse toteuttaa aivan hattujen yläpintaan. Suihkuinjektointimenetelmän eduksi voidaan lukea myös mahdollisuus tarkastella valmista rakennetta kaivujen ja pilareista otettujen näytteiden avulla.

Kirjallisuudessa oli esitelty myös suihkuinjektointimenetelmän käytöstä aiheutuvia haittoja. Työskentely-ympäristön likaantuminen sementtiliettestä on väistämättöä suihkuinjektointimenetelmää käytettäessä. Lisäksi menetelmän käyttö edellyttää paaluhattujen aseman selvittämistä ja hattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttämistä, kun ratapenkereitä korjataan suihkuinjektoinnilla. Hattujen mahdollisia kallistumisia ei menetelmää käytettäessä pystytä korjaamaan, ja matalia penkereitä korjattaessa ovat pitkät raidevaraukset tarpeen.

Koekohteessa todettiin suihkuinjektointimenetelmän suurimmaksi käytännön ongelmaksi ratapenkereen pehmentyminen ja sementtilietteen vuoto ratapenkereen läpi. Pehmentymisen seurauksena syntyi penkereeseen isoja painumia. Painumista johtuen oli suihkutuspaineita pienennettävä, ja tästä syystä jäivät valmiiden pilarien poikkileikkausmitat suunniteltua pienemmiksi. Painumista johtuen jouduttiin myös raiteiden liikehdintää tarkkailemaan tehostetusti, ja lisäksi syntyneet painumavauriot oli korjattava. Myös ratapengertä oli paranneltava ja vuotokohtia tukittava. Ratapenkereen läpi vuotanut sementtiliete piti läjittää ratapenkereeseen kaivinkoneavusteisesti. Toinen koekohteessa havaittu käytännön ongelma oli porareian tukkiminen suihkuinjektoinnin päätyttyä. Tukkimismekanismia yritettiin pa-

rannella useaan otteeseen, mutta siitä huolimatta valui sideainesuspensiota hukkaan reilusti useita pilareita suihkutettaessa.

Koekohteessa havaittiin hankalaksi myös paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttäminen. Täyttö piti tehdä useaan kertaan, mikä vei aikaa ja lisäsi sementtimenekkiä. Reunimmaisten paaluhattujen alapuolisten tyhjätilojen täittyminen saatiin selvitettyä kaivujen avulla, mutta keskimmäisten paaluhattujen tilanteesta ei voitu varmistua. Tyhjätilojen täyttymisen lisäksi myös porauksen tielle tulleet esteet osoittautuivat ongelmallisiksi. Porauksen pysähtyessä esteeseen oli selvitetävä, oliko kyseessä kallistunut paaluhattu vai iso kivi. Kallistuneen paaluhattun läpi ei saanut porata, kun taas isojen kivien kohdalla sai porausta jatkaa järeämällä kalustolla kiven läpi.

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että suihkuinjektointimenetelmällä ratapenkereeseen toteutettu maabetoninen laattarakenne soveltuu korkeiden ratapenkereiden painumaongelmien korjaamiseen hyvin. Paaluhattujen korkeusaseman selvittäminen ja hattujen alapuolisten tyhjätilojen täyttäminen ennen suihkuinjektointia tuovat lisää työtä muihin käytössä oleviin korjausmenetelmiin verrattuna, mutta suihkuinjektointimenetelmää käytettäessä saavutetaan pitkäaikaiset korjaustulokset.

Suihkuinjektoinnin soveltuvuutta ratapenkereiden korjaukseen puoltavat myös kohtuulliset toteutuskustannukset. Suihkuinjektointimenetelmää käytettäessä välttään myös massiivisilta liikennehaittakustannuksilta, koska suihkuinjektoinnin vuoksi ei raidetta tarvitse avata eikä raidevarauksia tehdä. Matalilla penkereillä nousevat liikennehaittakustannukset merkittäviksi, joten niitä korjattaessa on syytä etsiä muita ratkaisuja.

Vaikka koekohteessa ei onnistuttu muodostamaan yhtenäistä suihkuinjektointia laattaa ratapenkereeseen, saatiin kohteen toteutuksesta arvokasta tietoa suihkuinjektointiin liittyvistä ongelmista, kun suihkutusta tehdään junaliikenteen alaiseen ratapenkereeseen. Koekohteessa suihkutetut pilarit olivat niistä porattujen näytteiden perusteella kovia, mutta suunniteltua pienemmistä suihkutuspaineista johdun jäivät poikkileikkaukset niin pieniksi, etteivät ne leikanneet toisiaan. Myöhemmissä tarkasteluissa huomattiin, että korjattu rataosuus oli painunut vähemmän kuin vieressä oleva, paalulaatan varaan perustettu korjaamaton rataosuus.

Ehdotukset jatkotoimenpiteiksi

Tulevissa kohteissa olisi hyvä selvittää muutaman koepilarin suihkutuksen avulla suihkutuspaine, jonka suihkuinjektointi ratapenger kestää pehmentymättä. Koepilareiden mitat voidaan selvittää kaivamalla ne suihkutuksen jälkeen esiin, jolloin

nähdään millaisia pilareita valituilla suihkutuspametreilla saadaan aikaan kyseisessä penkereessä. Jos tarkemmat suihkuinjektointisuunnitelmat tehdään vasta koepilareiden toteutuksen jälkeen, voidaan ennakoida mahdolliset poikkeamat ja hankaluudet toteutuksessa, ja tällöin laatta saadaan varmemmin muodostettua. Työturvallisuuteen tulisi kiinnittää erityistä huomiota tulevissa kohteissa, sillä liikkuminen ja työskentely pehmentyvällä ratapenkereellä sekä vilkkaasti liikennöidyllä raiteella on vaarallista. Oman vaarallisen lisänsä työskentelyyn tuo itse suihkutuskvaihe, jossa ollaan tekemisissä erittäin korkeapaineisen sideainesuspension suihkun kanssa.

Tässä tutkimuksessa ei selvitetty suihkuinjektoidun kohdan ylittävien junien vaikutusta ratapenkereen stabiilitettiin. Koekohteessa huomattiin, että yhtä pilaria suihkutettaessa tuli ratapenkereeseen suuri painuma heti junan ylityksen jälkeen. Junien aiheuttamat värinät vaikuttavat penkereessä tiettyyn syvyyteen asti ja saattavat häiritä betonin sitoutumista, mikäli penger ei ole riittävän korkea. Jatkotutkimuksissa olisi syytä selvittää värinöiden vaikutussyvyys laskennallisesti, jotta painumayllätyksiltä vältyttäisiin.

Jatkossa olisi hyvä tutkia myös suihkuinjektointimenetelmällä toteutettuun laattaan mahdollisesti jäävien aukkojen vaikutusta koko rakenteen toimintaan. Jos radan keskiosassa olevien tyhjätilojen täyttymisestä ei voida varmistua ja tyhjätiloja jää täytöstä huolimatta runsaasti, saattaa sideainesuspensio karata niihin suihkutuskvaiheessa. Tällöin suihkuinjektoitava pilari ei muodostu kunnolla ja valmiiseen laattarakenteeseen voi jäädä aukkoja.

Tässä tutkimuksessa ei otettu kantaa suihkuinjektoidun pilaririvin optimaaliseen korkeuteen ratapenkereessä. Paaluhattujen voimakkaasta kallistumisesta johtuen saatetaan poraus joutua toteuttamaan reilusti paaluhattujen yläpuolelle, ettei poraus pysähtyisi hattuihin. Käytettäessä tällöin pieniä suihkuinjektointipaineita jää pilaririvin ja paaluhattujen väliin maakerros, jonka käyttäytymisestä ei ole tällä hetkellä tietoa. Hattujen ja laatan väliin jäävän maakerroksen käyttäytymisen selvittäminen jää jatkotutkimuksen kohteeksi.

Tutkimuksessa ei selvitetty yksittäisten, paaluhatturivien väleihin tehtyjen suihkuinjektoidujen pilarien korjausvaikutusta ratapenkereiden painumaongelmiin. Koekohteeseen toteutetuista suihkuinjektoiduista pilareista vain muutamat osuivat paaluhatturivien väleihin, joten niiden korjausvaikutusta ei voida luotettavasti arvioida tarkastelemalla radan kunnossapidon tarvetta jatkossa. Luotettavien johtopäätösten tekemiseksi oli syytä korjata pidempi rataosuus kyseisellä menetelmällä, ja tarkkailla kunnossapidontarvetta tällä osuudella.

Lähteet

- Andersson, K. (Arcus Oy). 2007. Suunnitelmapiirokset Ratahallintokeskuksen koeprojektiin rataosuudella Vuohimäki-Kela.
- Bell, F. 1993. Engineering Treatment of Soils. Taylor & Francis. 302 s. ISBN 0-419-17750-7.
- Brill, G. & Burke, G. & Ringen, A. 2003. A ten-year Perspective of Jet Grouting: Advancements in applications and technology. Geotechnical Special Publication 2003, no. 120 I. Sivut 218-235. ISSN 0895-0563.
- Chen, R.P. & Chen, Y.M. & Han, J. & Xu, Z.Z. 2008. A theoretical solution for pile-supported embankments on soils under one-dimensional compression. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 45, No. 5, May 2008, sivut 611-623. ISSN 1208-6010.
- Dancygier, A.N. & Yankelevsky, D.Z. 1994. A soft layer to control soil arching above buried structure. Elsevier Science Ltd. Engineering Structures, Vol. 18, Issue 5, May 1996, sivut 378-386.
- Gazzarini, P. & Kokan, M. & Jungaro, S. 2005. Case History of Jet-Grouting in British Columbia. Underpinning of CN Rail Tunnel in North Vancouver. www.groutline.com (/Articles Published/December 2005). Viitattu 23.8.2008.
- Han, J. & Gabr, M.A. 2002. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 128, No. 1, January 2002, sivut. 44-53.
- Hayward Baker 2004. www.haywardbaker.com (Services/Grouting/Jet Grouting/Jet Grout Brochure) Viitattu 25.10.2008.
- Henn, R. 1997. Practical Guide to Grouting of Underground Structures. London: Thomas Telford Ltd. 191 s. ISBN 0784401403.
- Ho, C. 2007. Fluid-soil Interaction Model for Jet Grouting. Geotechnical Special Publication 2007, no. 168. 10 s. ISSN 0895-0563.
- Ichise, Y. & Yamakado, A. & Takano, S. & Yokohama. 1974. United States Patent no. 3802203 : High Pressure Jet-Grouting Method. 6s.

InfraRYL 2006: infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset 2006. Osa 1: Väylät ja alueet. Helsinki: Rakennustieto. 622 s. ISBN 951-682-801-9.

Jääskeläinen, H. & Rathmayer, H. 1975. Paaluhattujen käyttö tie- ja ratapenkereissä. Helsinki: VTT Offsetpaino. 89 s. ISBN 951-38-0209-4.

Jääskeläinen, R. 2003. Pohjarakennuksen perusteet. Tampere: Tehokopiointi. 168 s. ISBN 951-9004-95-5.

Kolymbas, D. 1997. Geotechnik – Tunnelbau und Tunnelmechanik: Eine systematische Einführung mit besonderer Berücksichtigung mechanischer Probleme. Germany: Springer-Verlag. 326 s. ISBN 3-540-62805-3.

Kujala, J. 2005. Paalulaattarakenteiden suunnittelu. Tiehallinnon selvityksiä 25/2005. Helsinki: Edita Prima Oy. 143 s. + 10 liites. ISBN 951-803-509-1.

Mara, J. 2000. Puupaaluilla perustettujen tierakenteiden vauriot ja korjausmenetelmät. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Korkeakoulu. 110 s + 26 liites.

McNulty, J. W. 1965. "An Experimental study of arching in sand." Doctoral thesis. USA: Waterways Experiment Station. 190 s.

Mikkonen, T. 2005. Pengerpaalurakenteet liikenteen alaisella raiteella. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu. 107 s + 9 liites.

Nylund, S. 1978. Tie- ja ratapenkereissä käytettävien paaluhattujen käyttöalueet ja rakenteellinen mitoitus. Lisensiaatintutkimus. Teknillinen korkeakoulu.

Low, B. K. & Tang, S. K. & Choa, V. 1994. Arching in piled embankments. ASCE Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 120, No. 11, November 1994, sivut 1917-1938.

Lyöntipaalutusohjeet, LPO-72. 1972. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys Oy. 72 s.

Lyöntipaalutusohje, LPO-2005, Teräsbetoni- ja puupaalut. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 134 s. ISBN 951-758-453-9.

Pacchiosi Drill Spa. 2008. http://www.pacchiosi.com/index_ing.html (Technologies/Injection System PS 3). Viitattu 13.9.2008.

Pearlman, S. 1998. Jet grouting: New directions. Civil Engineering, Aug98, Vol. 68 Issue 8, sivu 44. ISSN 08857024.

Rautatievirasto. 2008. Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt). 10. muutettu painos. http://www.finlex.fi/data/normit/30977-Jtt_10_painos.pdf . Viitattu 27.8.2008

RHK 1999. Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL). Osa 3 perustamis- ja vahvistamistyöt. Ratahallintokeskuksen julkaisu- ja. Helsinki. 91 s. ISBN 952-445-018-6.

RHK 2002. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO). Osa 3 radan rakenne. Helsinki: Ratahallintokeskus. 44 s.

RHK 2006. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2006. Helsinki. 35 s. + 9 liites. ISBN 952-445-158-1.

RHK 2007a. Ratahallintokeskuksen järjestämä turvallisuuskoulutus Sammonmäessä kesäkuussa 2007.

RHK 2007b. Ratahallintokeskuksen urakoitsijalle toimittama raportti koekohteen yleistiedoista, suoritetuista tutkimuksista ja korjausyrityksistä.

RHK 2008a. www.rhk.fi (/Rataverkko). Viitattu 20.8.2008.

RHK 2008b. Ratahallintokeskus. Radanpidon turvallisuusohjeet (TURO). Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 21. Hyvinkää: VR Kirjapaino. 58 s + 4 liites. ISBN 978-952-445-241-0.

RIL 156. 1995. Maarakennus. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto. 486 s. ISBN 951-758-343-5.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2008. Pohjarakentamistöiden suorittaminen = Execution of special geotechnical works. Osa 2: Syvästabilointi, lujitettu täyttö, injektointi, suihkuinjektointi, pystyjoitus ja syvätärytys. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 265 s. ISBN 978-952-5650-65-5. (Kuvien lainaus tehty SFS:n luvalla)

Tektracker 2008. www.tektracker.com (/Jet Grouting/Technology Overview/Calculating Approximate Jet Grouting Parameters). Viitattu 26.10.2008.

Terzaghi, K. 1936. "Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door." Proc., 1st Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge: Harvard University. Sivut 307-311.

Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, New York. 528 s. ISBN 0471853054.

Tiehallinto. 2001. Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Edita Prima Oy. 46 s. ISBN 951-726-817-3.

Tiehallinto. 2003. Tien perustamistavan valinta. Helsinki: Oy Edita Ab. 49s + 8 liites. ISBN 951-803-061-8

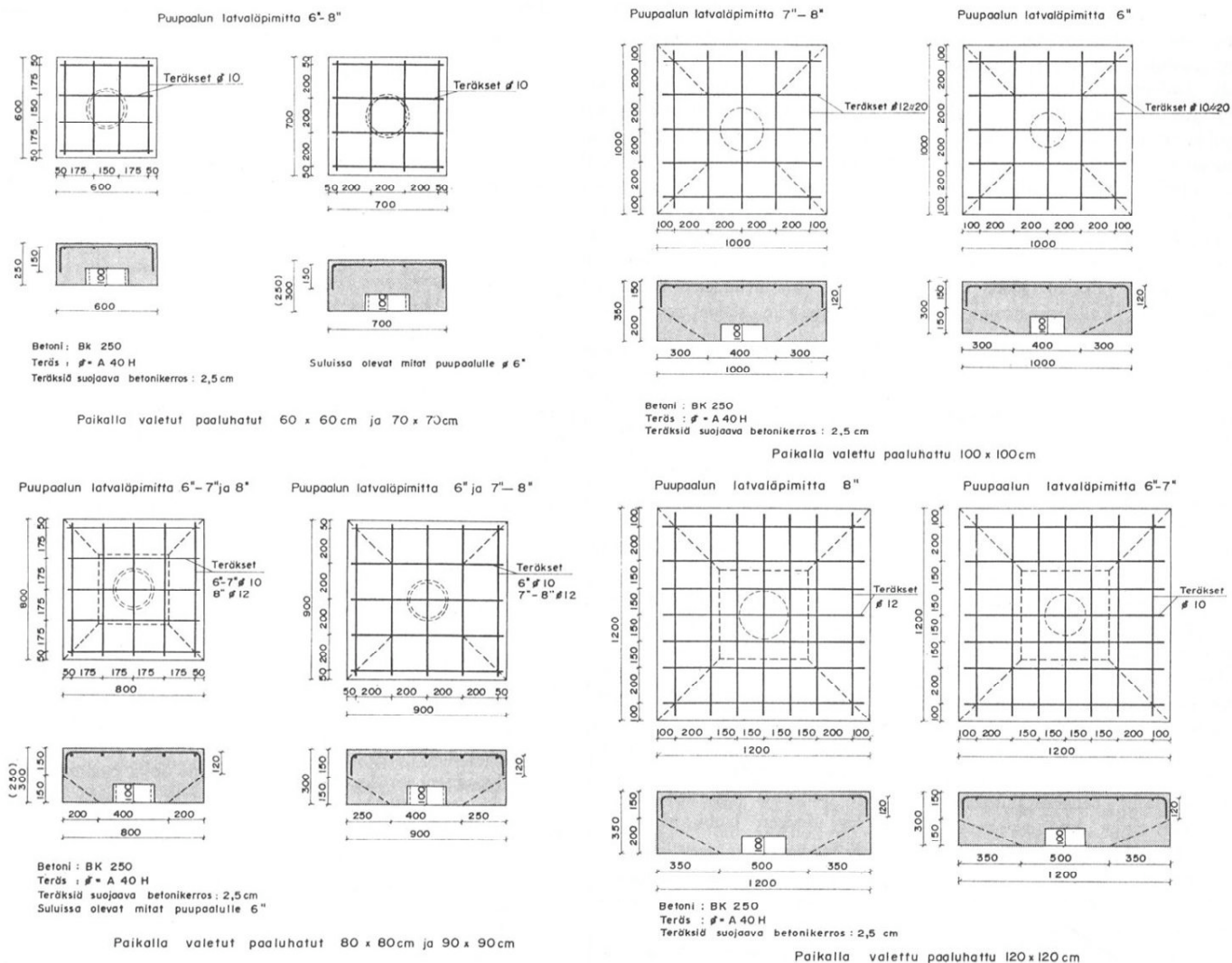
Tie- ja vesirakennushallitus (TVH). 1972. Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, Osa 4, Geoteknillinen suunnittelu ja perustamismenetelmät. Helsinki: TVH. 408 s.

Valtionrautatiet (VR). 1976. Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys (RMYT) 1976, 912 Vahvistamistyöt. Helsinki: VR. 15 s.

Viitala, J. 1993. Suihkupaalut pohjarakentamisessa. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu. 89 s + 16 liites.

Zilch, K. & Diederichs, C. & Katzenbach, R. 2001. Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand. Germany: Springer-Verlag. 1846 s. ISBN 3-540-65760-6.

Liite 1.



Tavallisimmat paaluhattujen tyypit TVH 1972 mukaan.

Liite 2.

Suihkuinjektointiparametrien vaihteluvälit, mukailtu. (Lähde: SFS 2008, Zilch et al. 2001)

Suihkuinjektointiparametrit	Yksittäinen neste	Kaksoisneste (ilma)	Kaksoisneste (vesi)	Kolmoisneste
Injektointiaineen virtausnopeus (l/min)	50...450	50...450	50...200	50...200
Injektointiaineen paine (MPa)	30...50	30...50	>2	>2
Vedenpaine (MPa)	-	-	30...60	30...60
Veden virtausnopeus (l/min)	-	-	50...150	50...150
Ilman paine (MPa)	-	0,2...1,7	-	0,2...1,7
Ilman virtausnopeus (m ³ /min)	-	3...12	-	3...12

Liite 3.

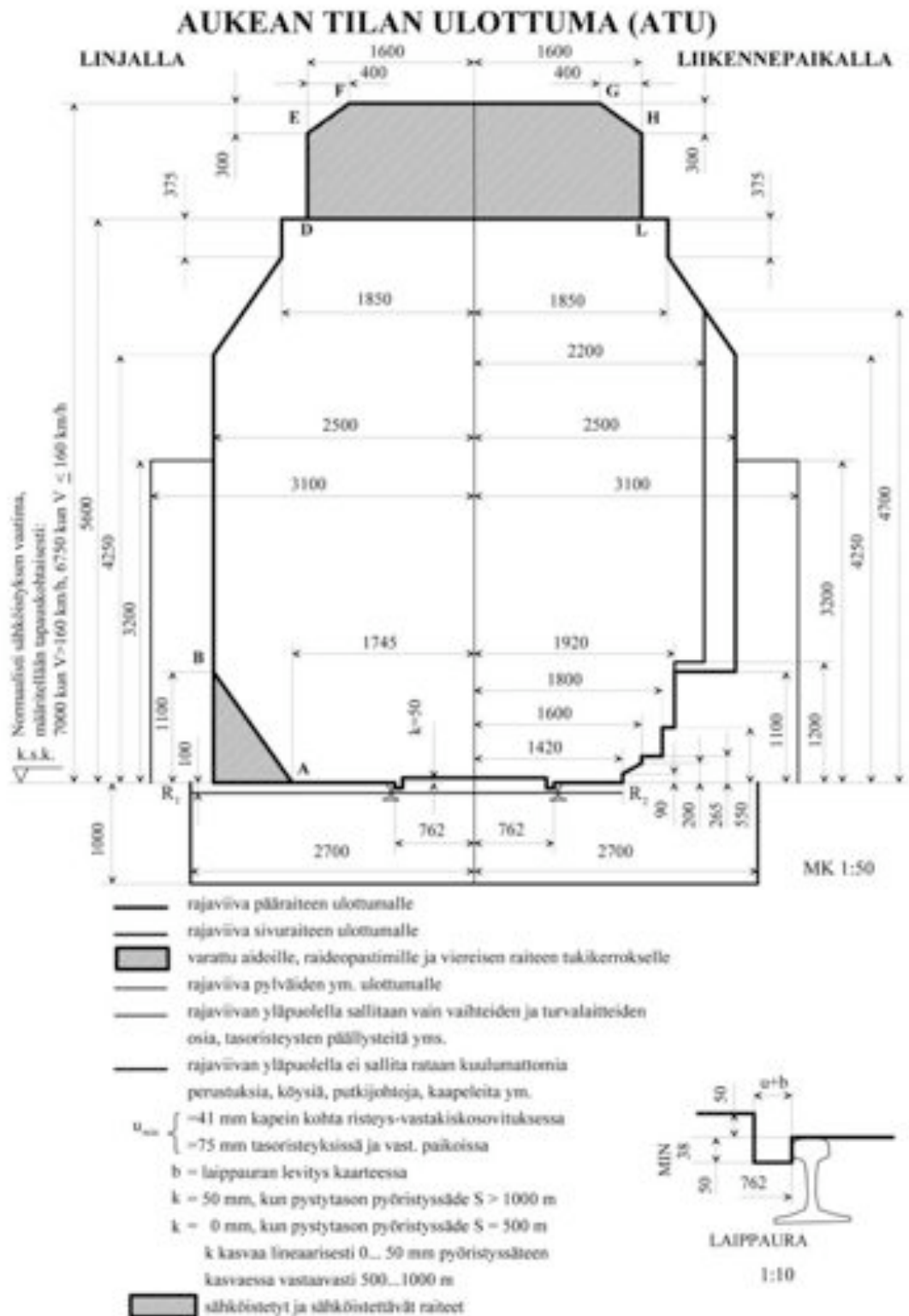
Esimerkki 1 suihkuinjektointitöiden työmaadokumentoinnista. (Lähde: SFS 2008)

[illegible]

Esimerkki 2 suihkuinjektointitöiden työmaadokumentoinnista. (Lähde: SFS 2008)

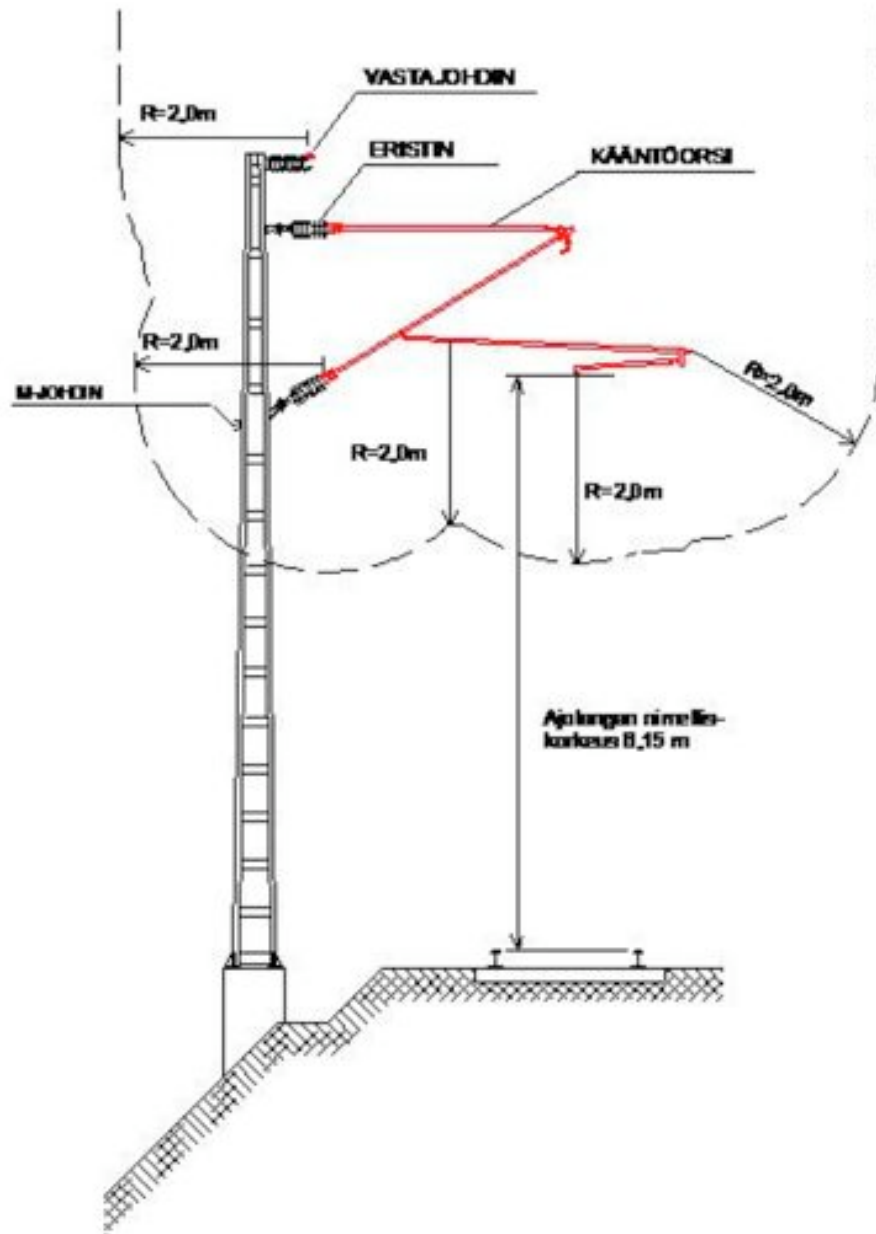
Liite 5.

Aukean tilan ulottuma (ATU). (Lähde: RHK 2008b)



Liite 6.

Sähköradan suojaetäisyydet. (Lähde: RHK 2008b)



Liite 7.

	Tyhjiälojen täyttö	Vaakaosuus teräspontit	Stabilointilaataselementti	Suhteellisuudesta pilareista muodostuva laattarakenne
Kustannukset, vaativuus ja korjausvaikutuksen pituus *				
Rakennus- ja liikennehaittakustannukset				
Pienet	x			
Keskinkertaiset		x		x
Suuret			x	
Tekninen vaativuus				
Erittäin vaativa				
Vaativa	x	x	x	x
Helppo				
Korjausvaikutus				
Pitkä		x	x	x
Lyhyt	x			
Esivalmistelut				
Paaluhattujen aseman selvittäminen				
Kyllä	x	x		x
Ei			x	
Paaluhattujen alapuolisen tyhjätilan täyttö				
Kyllä				x
Ei	x	x	x	
Toteutus				
Tarvittava raidevaraus				
Lyhyt				
Pitkä			x	
Ei tarvita	x	x		x ^{**}
Paaluhattujen voimakas kallistelu				
Estää menetelmän käytön		x		
Haittaa työn etenemistä				x
Ei vaikutusta	x		x	
Aiheuttaa värinöitä/heikentää radan stabiiliteettia				
Kyllä		x		
Ei	x		x	x
Valmis rakenne				
Rakenteen tarkastelu mahdollinen				
Kyllä			x	x
Ei	x	x		
Kunnossapidon tarve jatkossa				
Kyllä	x			
Ei		x	x	x
*Lähde: RHK 2006 s.32-33				
** Korkealla ratapenkereellä. Matalalla ratapenkereellä pitkä raidevaraus.				

Liite 8.

